

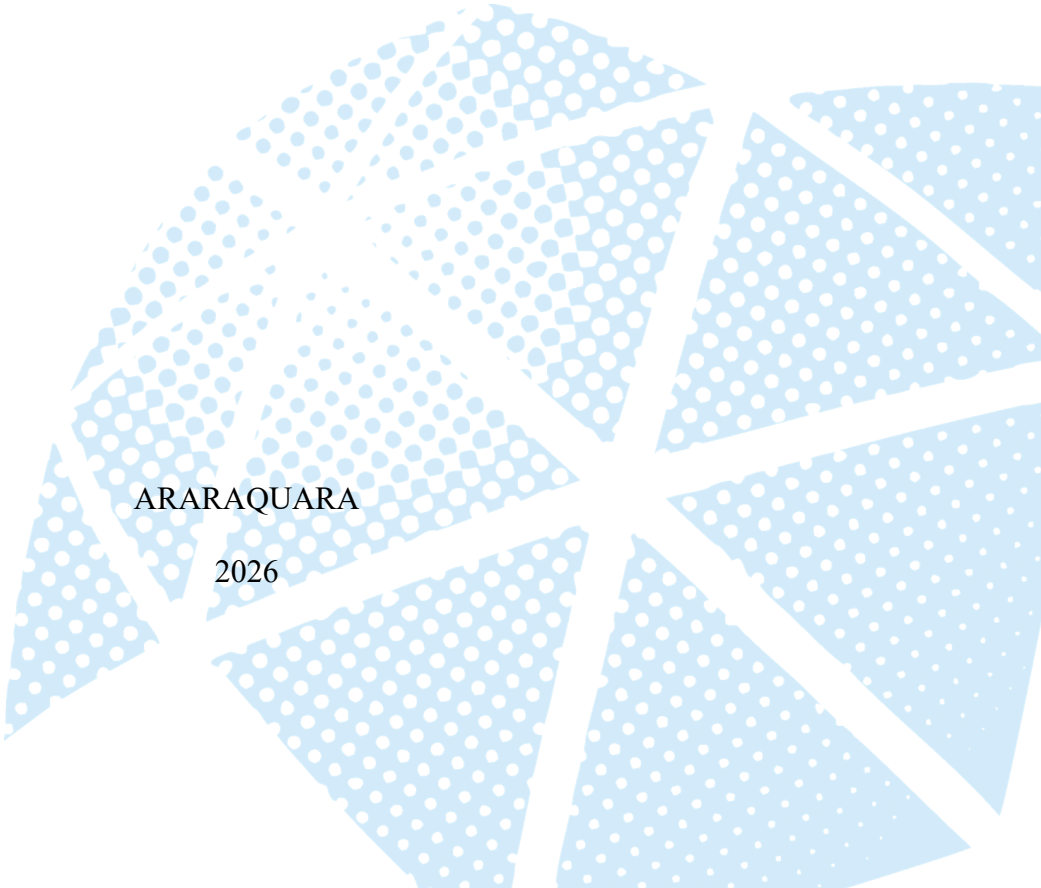
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS E LETRAS – CÂMPUS DE ARARAQUARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
DOUTORADO EM ECONOMIA**

IAGO EMIDIO LUTZ DE SOUZA

RAZÃO ÓTIMA DE HEDGE NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

ARARAQUARA

2026



IAGO EMIDIO LUTZ DE SOUZA

RAZÃO ÓTIMA DE HEDGE NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Araraquara, Programa de Pós-Graduação em Economia, Doutorado em Economia.

Área de Concentração: Economia Aplicada.

Orientador(a): Prof. Dr. Mário Augusto Bertella.

ARARAQUARA

2026

S729r

Souza, Iago Emidio Lutz de

Razão ótima de hedge no setor sucroalcooleiro / Iago Emidio Lutz de Souza. -- Araraquara, 2026

122 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Araraquara

Orientador: Mário Augusto Bertella

1. Hedge (Finanças). 2. Avaliação de riscos. I. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa apresenta potencial impacto científico, técnico e econômico ao qualificar o debate sobre gestão de risco e razão ótima de hedge no setor sucroalcooleiro, segmento estratégico para o agronegócio, a matriz energética e a inserção internacional do Brasil. Ao integrar fricções operacionais, alocação alternativa de riqueza e medidas de risco sensíveis a perdas, o estudo fortalece a produção de conhecimento em economia aplicada e finanças, com potencial de apoio à tomada de decisão por empresas, agentes financeiros e formuladores de políticas. Seu impacto institucional e social decorre da contribuição para maior resiliência econômica, eficiência alocativa e sustentabilidade de uma cadeia produtiva relevante para geração de renda, emprego, exportações e energia renovável. Ademais, o trabalho possui potencial formativo e de internacionalização ao dialogar com a literatura contemporânea de gestão de risco em commodities e ampliar a visibilidade acadêmica de temas vinculados ao desenvolvimento sustentável e à bioeconomia.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research has scientific, technical, and economic impact potential by strengthening the debate on risk management and optimal hedge ratio determination in the sugar and ethanol sector, a strategic segment for Brazilian agribusiness, the energy matrix, and the country's international insertion. By integrating operational frictions, alternative wealth allocation, and downside-sensitive risk measures, the study advances knowledge in applied economics and finance, with potential relevance for firms, financial agents, and policymakers. Its institutional and social impact lies in its contribution to greater economic resilience, allocative efficiency, and sustainability in a productive chain that is highly relevant for income generation, employment, exports, and renewable energy. In addition, the research has educational and internationalization potential by engaging with the contemporary literature on commodity risk management and by increasing academic visibility for themes related to sustainable development and the bioeconomy.

IAGO EMIDIO LUTZ DE SOUZA

RAZÃO ÓTIMA DE HEDGE NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Araraquara, Programa de Pós-Graduação em Economia, Doutorado em Economia.

Área de Concentração: Economia Aplicada

Data da defesa: 09/04/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mário Augusto Bertella
UNESP - Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Araraquara

Prof. Dr. André Luiz Correa
UNESP - Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Araraquara

Prof. Dr. José Maria Ferreira Jardim da Silveira
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Mateus Pereira Lavorato
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Dedico este trabalho à Herbert Lutz.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço imensamente a orientação do Prof. Dr. Mário Augusto Bertella, a confiança depositada em mim, as conversas descontraídas e principalmente a paciência.

A minha mãe, Luciane Lutz, pelo apoio incondicional, pelos conselhos e pela disposição.

Ao amigo Augusto Seabra Santos, pela grande ajuda no desenvolvimento do estudo e pela grande amizade.

Ao meu irmão, Danilo Lutz, pela paciência ao me ajudar e me ensinar Python.

Ao amigo, Thiago Rossi, que me apoiou e permitiu que eu ingressasse no programa mesmo trabalhando.

Aos demais membros da minha família e amigos, por aguentarem o quanto fiquei insuportável, especialmente na reta final de desenvolvimento da tese.

A todos que torceram por mim, me apoiaram de alguma forma e fizeram parte dessa caminhada.

RESUMO

O presente trabalho investiga como o relaxamento de hipóteses do modelo tradicional de razão ótima de hedge (mínima variância) altera a quantidade ótima de hedge no setor sucroalcooleiro, com aplicação aos mercados futuros de açúcar e etanol. A partir de pressupostos mais próximos da realidade operacional, o estudo incorpora preferências do produtor via utilidade esperada com aversão relativa ao risco constante (ARRC), fricções associadas à implementação do hedge e a possibilidade de investimento em um ativo alternativo, capturando a competição entre derivativos e decisões de alocação de riqueza. Além do paradigma média-variância, o trabalho introduz medidas de risco sensíveis a perdas por meio de momentos parciais inferiores (LPM), avaliados sob diferentes referências de retorno (targets) e em cenários exógenos de participação do ativo alternativo e níveis de custos. Os resultados indicam que fricções e custos operacionais comprimem de forma significativa a razão ótima de hedge, sendo o principal determinante da redução de h^* , enquanto a presença do ativo alternativo amplifica o efeito ao reduzir o benefício marginal de ampliar a cobertura. Quando critérios downside mais conservadores são adotados - especialmente com targets em percentis mais baixos - as razões ótimas tendem a se tornar mais restritivas e, em combinações de custos mais severos e alta participação do ativo alternativo, podem se aproximar de zero, sugerindo que a decisão ótima pode ser reduzir substancialmente ou abandonar o hedge. A avaliação econômica é conduzida pelo Equivalente-Certo (CE) e pelo ganho marginal de bem-estar (ΔCE), mostrando que, quando o hedge é viável sob fricções, modelos *downside* podem entregar maiores ganhos de bem-estar em cenários adversos. As evidências reforçam que a viabilidade do hedge depende menos apenas da modelagem estatística e mais das fricções, da liquidez e das restrições financeiras enfrentadas pelo produtor.

Palavras-chave: razão de hedge; mercados futuros; açúcar e etanol.

ABSTRACT

This study investigates how relaxing the standard minimum-variance optimal hedge ratio assumptions changes the optimal hedging demand in the Brazilian sugarcane sector, with applications to sugar and ethanol futures. To bring the hedging problem closer to operational reality, the proposed framework embeds producer preferences through an expected-utility specification with constant relative risk aversion (CRRA), explicitly accounts for implementation frictions (rebalancing/turnover and contract roll-over costs), and allows part of wealth to be allocated to an alternative investment asset, capturing the competition between derivatives-based hedging and broader portfolio choices. In addition to the mean–variance benchmark, the analysis introduces downside-sensitive risk measures using lower partial moments (LPM) under different return targets and evaluates outcomes across exogenous scenarios for alternative-asset participation and cost levels. The results support the main economic intuition: hedging frictions and operational costs substantially compress the optimal hedge ratio and emerge as the primary driver of reductions in h^* , while alternative investment opportunities amplify this effect by lowering the marginal benefit of additional coverage. When more conservative downside criteria are adopted - particularly with lower target percentiles - the optimal solution becomes markedly more restrictive and, under combinations of higher costs and larger alternative-asset shares, hedge ratios can approach zero, indicating that scaling down or even foregoing hedging may be optimal rather than a failure of the strategy. Welfare comparisons are conducted using the certainty equivalent (CE) and incremental welfare gains (ΔCE) relative to the unhedged portfolio, showing that when hedging remains economically viable under frictions, downside-based specifications can deliver higher welfare improvements in adverse scenarios. Overall, the evidence highlights that hedging feasibility depends less on statistical sophistication per se and more on market frictions, liquidity conditions, and financial constraints faced by producers.

Keywords: hedge ratio; futures markets; sugar and ethanol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do pipeline metodológico do estudo	44
Figura 2 - Momentos parciais inferiores (LPM) calculados para o modelo ARRC média variância, sem custos de transação, para diversos níveis de investimento no ativo alternativo e perfil de risco médio.....	68
Figura 3 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo um: modelo padrão.	69
Figura 4 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo dois: modelo padrão mais investimento, $\gamma = 1$	70
Figura 5 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo dois: modelo padrão mais investimento, $\gamma = 3$	71
Figura 6 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo dois: modelo padrão mais investimento, $\gamma = 5$	72
Figura 7 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo três: modelo padrão mais custos de transação como proporção do valor inicial contrato, com $\gamma = 1$	73
Figura 8 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo três: modelo padrão mais custos de transação como proporção do valor inicial contrato, com $\gamma = 3$	74
Figura 9 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo três: modelo padrão mais custos de transação como proporção do valor inicial contrato, com $\gamma = 5$	75
Figura 10 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo quatro: modelo padrão com investimento no ativo alternativo, mais custos de transação, com $\gamma = 1$	76
Figura 11 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo quatro: modelo padrão com investimento no ativo alternativo, mais custos de transação, com $\gamma = 3$	77
Figura 12 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo quatro: modelo padrão com investimento no ativo alternativo, mais custos de transação, com $\gamma = 5$	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese da literatura sobre hedge ótimo e extensões relevantes.....	40
Tabela 2 - Resumo estatístico das distribuições de retornos diários	62
Tabela 3 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 1$	64
Tabela 4 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 3$	66
Tabela 5 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 5$	67
Tabela 6 - Síntese do ganho de bem-estar ΔCE no período OOS para cenário BASE e $walt = 10\%$ (Anexo D, Tabela 20).....	80
Tabela 7 - OOS (Cenário: BASE, $walt = 10\%$, $\gamma = 3$).....	81
Tabela 8 - Síntese das hipóteses e evidências empíricas.....	86
Tabela 9 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 1$	102
Tabela 10 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 3$	103
Tabela 11 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 5$	104
Tabela 12 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + A_ONLY, $\gamma = 1$	105
Tabela 13 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + A_ONLY, $\gamma = 3$	106
Tabela 14 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + A_ONLY, $\gamma = 5$	107
Tabela 15 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + AE, $\gamma = 1$	108
Tabela 16 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + AE, $\gamma = 3$	109
Tabela 17 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + AE, $\gamma = 5$	110

Tabela 18 - Testes de diagnóstico.	111
Tabela 19 - Métricas para cenário LOW e $walt = 10\%$	112
Tabela 20 - Métricas para cenário BASE e $walt = 10\%$	113
Tabela 21 - Métricas para cenário HIGH e $walt = 10\%$	114
Tabela 22 – Métricas para cenário LOW e $walt = 25\%$	115
Tabela 23 - Métricas para cenário BASE e $walt = 25\%$	116
Tabela 24 - Métricas para cenário HIGH e $walt = 25\%$	117
Tabela 25 - Métricas para cenário LOW e $walt = 50\%$	118
Tabela 26 - Métricas para cenário BASE e $walt = 50\%$	119
Tabela 27 - Métricas para cenário HIGH e $walt = 50\%$	120

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO E DO RISCO DE PREÇOS.....	13
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO ECONÔMICA.....	15
1.3 LACUNAS NA LITERATURA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	18
1.4 HIPÓTESES DE PESQUISA	20
1.5 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	21
1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE	21
2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 HEDGE EM COMMODITIES AGRÍCOLAS	23
2.2 RAZÃO ÓTIMA DE HEDGE: MÍNIMA VARIÂNCIA E EXTENSÕES.....	27
2.2.1 Modelo de mínima variância: formulação e interpretação econômica	27
2.2.2 Extensões: retorno esperado, utilidade e medidas de risco assimétricas	29
2.3 AVERSÃO AO RISCO, DOWNSIDE RISK E MEDIDAS PARCIAIS	31
2.3.1 Aversão ao risco e utilidade esperada	31
2.3.2 <i>Downside risk</i> , semivariância e LPM	32
2.4 CUSTOS DE TRANSAÇÃO, FRICÇÕES OPERACIONAIS E ATIVO ALTERNATIVO.....	36
2.5 SÍNTESE DA LITERATURA E POSICIONAMENTO DO TRABALHO	40
3 METODOLOGIA	44
3.1 DADOS, AMOSTRA E CONSTRUÇÃO DAS SÉRIES.....	45
3.2 MODELAGEM DO RISCO CONDICIONAL.....	49
3.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE HEDGE ÓTIMO E A INCORPORAÇÃO DE FRICÇÕES OPERACIONAIS	52
3.4 DESENHO EMPÍRICO E AVALIAÇÃO FORA DA AMOSTRA	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS E DIAGNÓSTICOS	61
4.2 RAZÕES ÓTIMAS DE HEDGE: ANÁLISE <i>IN-SAMPLE</i>	63
4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: CUSTOS, ATIVO ALTERNATIVO E AVERSÃO AO RISCO	68

4.4 AVALIAÇÃO DO BEM-ESTAR: ANÁLISE <i>OUT-OF-SAMPLE</i>	79
4.5 VERIFICAÇÃO DE ROBUSTEZ	82
4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS E VALIDAÇÃO DAS HIPÓTESES.....	85
CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
REFERÊNCIAS	92
ANEXO A – CENÁRIOS DO PORTFÓLIO AE (COM FUTURO DE ETANOL)	102
ANEXO B – ABORDAGEM DE MATURIDADE CONSTANTE (CM)	105
ANEXO C – DIAGNÓSTICOS	111
ANEXO D – MÉTRICAS	112

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO E DO RISCO DE PREÇOS

É amplamente reconhecida a importância da agropecuária brasileira para a economia nacional e para os mercados internacionais de commodities. Tal importância extrapola os limites fronteiriços do país, sendo extremamente relevante dentro do contexto econômico mundial. Essa posição acompanha o país desde sua descoberta e foi se expandindo ao longo do tempo, partindo da exportação de Pau-Brasil, passando pelas plantações de cana-de-açúcar, depois as plantações de café, até os dias atuais, onde são diversos os produtos agropecuários relevantes produzidos pelo Brasil (CARDOSO et al., 2022). A força do agronegócio brasileiro se manifesta tanto na geração de renda e emprego quanto na participação em mercados internacionais de commodities, contribuindo para a composição da pauta exportadora e para a formação de divisas, além de influenciar expectativas e decisões de investimento no âmbito doméstico.

Conforme dados do CEPEA (2024), os principais produtos de exportação do agronegócio são os oriundos do complexo da soja, carnes, produtos florestais, café e produtos derivados do setor sucroenergético. Esse resultado evidencia que, além de sua relevância histórica, o setor sucroalcooleiro mantém importância econômica contemporânea no Brasil (SILVA, 2020). O setor sucroenergético ocupa posição singular dentro do agronegócio por reunir, em uma mesma cadeia produtiva, produtos alimentícios e energéticos, com elevada integração a mercados internos e externos. Ao longo do tempo, essa cadeia passou por transformações relevantes, com modernização tecnológica e reorganizações produtivas, sem perder a centralidade do Brasil na produção e no comércio internacional de açúcar e etanol.

Segundo Silva (2020), o setor sucroalcooleiro evoluiu, deixando de ser a principal atividade comercial para se tornar a principal fonte de energia de biomassa do país. É por meio

da cana que ainda se produz o açúcar, mas também, atualmente, produz-se o etanol, a eletricidade e outros agregados derivados, o que reforça sua importância econômica, ambiental e social (LEITE et al., 2010). Essa característica “multifinalidade” aumenta o grau de complexidade da gestão das empresas do setor, pois parte do resultado econômico decorre de decisões simultâneas sobre mix produtivo, comercialização e, especialmente, gestão do risco associado a preços e receitas. Adicionalmente, a estrutura do setor e seu encadeamento com a logística, o crédito e o comércio exterior tornam o desempenho do segmento sensível a condições macroeconômicas e financeiras, além de fatores intrínsecos à produção agrícola.

Ainda líder na produção mundial de cana-de-açúcar, o setor é relevante gerador de renda e emprego; mesmo em safras com menor disponibilidade de matéria-prima, dados do USDA (2024), RFA (2024) e UNCTAD (2024) indicam a manutenção de sua competitividade e posição como um dos principais produtores e exportadores de açúcar e etanol no mundo. Esse protagonismo, no entanto, não elimina a exposição a choques e incertezas. Assim como toda atividade agropecuária, o setor sucroenergético está inserido em um contexto de fatores adversos - intempéries climáticas, doenças, sazonalidade e fatores macroeconômicos - que associam risco elevado à atividade. A volatilidade gerada por essas incertezas tende a reduzir previsibilidade de preços e afetar renda, fluxo de caixa e planejamento financeiro das empresas inseridas no processo produtivo.

Dessa distorção surge a relevância do mercado de derivativos agropecuários, buscando oferecer ferramentas para mitigação da volatilidade de preços e redução de incertezas, por meio da administração dos preços e da transferência (ou compartilhamento) de risco entre agentes com interesses distintos (RAIFUR & GARCIA, 2008). Em outras palavras, ao permitir a negociação de contratos vinculados a preços futuros, o mercado de derivativos cria um ambiente em que o produtor pode buscar proteção contra oscilações adversas, enquanto outros

participantes assumem exposição por motivos distintos (diversificação, arbitragem, especulação). Isso torna o debate sobre instrumentos de hedge particularmente relevante para o setor sucroenergético, no qual a volatilidade pode comprometer o resultado econômico mesmo quando a eficiência produtiva é elevada.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA E MOTIVAÇÃO ECONÔMICA

Os derivativos agrícolas são instrumentos financeiros utilizados para mitigar riscos e aumentar a segurança das operações no setor. Em termos gerais, contratos futuros e opções permitem proteção contra oscilações de preços e outros riscos de mercado, oferecendo uma forma de reduzir a incerteza associada à receita e ao planejamento financeiro do agente exposto (HULL, 2005). No contexto do agronegócio, esses instrumentos podem ser empregados para diversos objetivos: estabilizar receitas, reduzir a variabilidade de margens, apoiar decisões de financiamento e, em alguns casos, melhorar condições de crédito ao reduzir a percepção de risco por parte de credores e investidores.

No contexto brasileiro, além dos derivativos, empresas do agronegócio também recorrem a instrumentos financeiros como crédito, títulos de renda fixa e fundos de investimento, seja para suprir necessidades de capital, obter retornos previsíveis ou diversificar investimentos e reduzir riscos (MENEZES, 2019). Para empresas do setor sucroenergético, isso significa que a decisão de “quanto hedgear” frequentemente convive com outras decisões financeiras: manter caixa, alocar recursos em alternativas de investimento e administrar compromissos de curto e longo prazo. Assim, o hedge tende a ser parte de uma estratégia mais ampla de gestão de risco e gestão de liquidez, e não uma decisão isolada. No caso das usinas, contratos futuros e opções podem fixar preços de compra e venda de açúcar e etanol, protegendo contra oscilações de mercado e favorecendo planejamento financeiro e previsibilidade de custos e receitas, facilitando inclusive o acesso a capital para expansão ou custeio (ROSSI, 2008).

É a partir do uso desses instrumentos, em especial dos derivativos, que se pode interpretar o problema do produtor à luz da Moderna Teoria de Portfólio de Markowitz (1952). O modelo de composição de carteiras busca otimizar a relação risco–retorno da riqueza do produtor, combinando instrumentos financeiros e, eventualmente, distintas proporções de um mesmo instrumento para construir uma posição mais eficiente do ponto de vista de risco e retorno (MARKOWITZ, 1952; FARHI, 1999). Nesse sentido, o hedge pode ser interpretado como uma escolha de composição de portfólio: o produtor decide a proporção da exposição física que será coberta via contratos futuros, levando em conta o *trade-off* entre redução de risco e potenciais custos (explícitos e implícitos) associados à implementação.

No setor sucroenergético, essa lógica se conecta diretamente à decisão sobre o tamanho da posição a ser assumida no mercado futuro, isto é, ao cálculo da razão ótima de hedge. Ao estruturar uma operação de hedge, uma das primeiras questões diz respeito ao percentual da posição à vista que será coberta no mercado futuro para reduzir parte do risco, percentual este conhecido como razão ótima de hedge. Na prática, essa decisão é condicionada por elementos operacionais e institucionais: liquidez dos contratos, risco de base, frequência de rolagem, custos de corretagem e exigências de margem. Além disso, a atuação do setor em mercados distintos - como o uso recorrente de contratos do açúcar em mercados internacionais e o uso de instrumentos domésticos para etanol - adiciona complexidade, pois diferenças de moeda, formação de preços e microestrutura afetam a qualidade da proteção.

Apesar do reconhecimento dos derivativos como ferramentas relevantes de gerenciamento de risco, o mercado futuro agropecuário no Brasil ainda é pouco explorado no segmento, com baixa participação relativa desses contratos ao longo do tempo, especialmente para açúcar e etanol (PINHEIRO et al., 2019). Entre os derivativos agropecuários negociados na BM&FBOVESPA, o etanol vem apresentando papel crucial (SANTOS e MAIA, 2016),

enquanto, no caso do açúcar, é comum a utilização de contratos negociados na NY Intercontinental Exchange, Inc. (ICE). Considerando o potencial de crescimento e a importância estratégica desses mercados, torna-se relevante investigar um modelo que permita determinar o percentual ótimo de hedge a ser realizado no mercado futuro dessas commodities, sobretudo quando se reconhece que a decisão pode ser limitada por condições reais de operação (GIACHINI, 2022).

Tradicionalmente, modelos de razão de hedge de mínima variância ou de média-variância associados à teoria da utilidade esperada têm sido utilizados com esse propósito. No entanto, críticas são levantadas em relação à sua capacidade de expressar retornos economicamente relevantes da carteira e à compatibilidade com as preferências dos investidores pelo risco, sobretudo quando o objetivo do agente é proteção contra perdas e quando existem fricções e restrições relevantes na implementação. Ademais, a literatura aplicada aponta limitações do hedge tradicional por mínima variância estimado via procedimentos estáticos, uma vez que essa abordagem pode desconsiderar heterocedasticidade e correlação serial e supor variâncias e covariâncias constantes, quando a evidência sugere que esses termos variam no tempo; com isso, a razão pode superestimar/subestimar a cobertura em subperíodos e levar a perdas por inadequação da posição (SILVA; NETO; MACHADO, 2016; SANTOS, 2017).

Portanto, uma abordagem menos restritiva e mais alinhada com a realidade do setor sucroalcooleiro deve ser considerada, levando-se em conta a presença de custos de corretagem no mercado futuro, a possibilidade de investimento em ativos alternativos e uma função de utilidade que melhor expresse as preferências dos investidores pelo risco. Ao incorporar explicitamente essas dimensões, abre-se espaço para compreender por que, mesmo com exposição relevante a preço e, em muitos casos, a câmbio, a decisão ótima pode não coincidir com a recomendação do modelo tradicional, e porque o hedge pode se mostrar parcial - ou até

não adotado - quando o ganho marginal de proteção não compensa custos e restrições de execução.

1.3 LACUNAS NA LITERATURA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A literatura sobre razão ótima de hedge em commodities agrícolas avançou significativamente nas últimas décadas, partindo de formulações clássicas baseadas em mínima variância e em representações operacionais via regressões do tipo OLS (MYERS; THOMPSON, 1989), e evoluindo para especificações que reconhecem a presença de heterocedasticidade, mudanças de regime e dinâmica de covariâncias (BOLLERSLEV, 1986; BAILLIE; MYERS, 1991; J.P. MORGAN, 1996). Em paralelo, uma agenda relevante de pesquisa passou a relaxar hipóteses centrais dos modelos tradicionais - notadamente a ausência de fricções e a neutralidade da medida de risco - ao incorporar custos de transação, alternativas de investimento e preferências explícitas do agente. Nesse sentido, Lence (1996) é referência ao introduzir fricções e investimento alternativo no problema de decisão, enquanto Mattos, Garcia e Nelson (2008) e Cruz Júnior (2009) avançam ao combinar relaxamentos adicionais com uma perspectiva de risco assimétrico (*downside*) e preferências via utilidade. Complementarmente, trabalhos como Lien e Tse (2000) e Nelson e Escalante (2004) reforçam que o critério de decisão (variância versus *downside* e estrutura de preferência) é determinante para o nível ótimo de hedge e para a interpretação econômica dos resultados.

No setor sucroenergético, embora existam contribuições relevantes discutindo instrumentos de derivativos e gestão de risco, a aplicação do arcabouço de composição de carteira/razão ótima ainda é relativamente mais restrita e, quando presente, tende a concentrar-se em recortes específicos do problema. Há estudos com foco em mercado e formação de preços e cross-hedge, como Calderon (2001) e Santos e Maia (2016), além de evidências aplicadas sobre hedge e risco de preço no açúcar no ambiente brasileiro (SILVA; NETO; MACHADO,

2016) e investigações com ênfase em efetividade e relações entre mercados (SANTOS, 2017). Em outra direção, trabalhos voltados a estratégias financeiras e operacionais do setor e ao papel dos derivativos no agronegócio ajudam a caracterizar o contexto institucional e de decisão (MENDES; SOUZA, 2003; RIBEIRO; OLIVEIRA; MENDES, 2014; SILVA et al., 2008; CALEGARI; BAIGORRI; FREIRE, 2012; LOPES, 2024). No entanto, em geral, essa literatura não integra de forma conjunta (i) uma medida de risco sensível a perdas (LPM) em um critério de decisão com preferências explícitas, (ii) a competição entre hedge e alocação em ativo alternativo, e (iii) a presença de fricções operacionais (custos de corretagem, turnover e rolagem) em uma avaliação sistemática fora da amostra, com métricas econômicas de bem-estar.

É precisamente nessa interseção que esta tese se posiciona. O objetivo aqui é normativo: não se trata de descrever o que as empresas necessariamente fizeram no passado, mas de derivar e testar qual estratégia seria ótima sob diferentes condições de mercado e restrições realistas, dadas preferências e critérios de risco compatíveis com a gestão de receita e de fluxo de caixa no setor. Nesse contexto, a contribuição¹ desta tese é tríplice: (i) integrar, em um único arcabouço de decisão, fricções operacionais, competição com ativo alternativo e medidas *downside* (LPM) sob preferências parametrizadas (LENCE, 1996; NELSON; ESCALANTE, 2004; LIEN; TSE, 2000; MATTOS; GARCIA; NELSON, 2008; CRUZ JÚNIOR, 2009); (ii) aplicar esse modelo ao contexto do setor sucroenergético brasileiro, considerando as particularidades de açúcar/etanol (incluindo limitações de liquidez e o componente cambial),

¹ Em conformidade com a Resolução UNESP nº 13, de 22 de abril de 2025, declaro que utilizei ferramentas de Inteligência Artificial como apoio instrumental em etapas pontuais de redação e revisão (por exemplo, sugestões de organização textual, clareza, concisão e aprimoramento linguístico), sempre com supervisão, validação e julgamento humano. O uso dessas ferramentas foi realizado em observância aos princípios de ética, honestidade acadêmica, responsabilidade e soberania humana, bem como às diretrizes de transparência e rastreabilidade previstas na referida Resolução. Assim, não houve delegação de autoria intelectual, e todo o conteúdo deste trabalho - incluindo ideias, modelagem, procedimentos metodológicos, análise de dados, interpretação dos resultados, conclusões, referências e eventuais inadequações - é de responsabilidade integral e exclusiva do autor.

com estimação dinâmica do risco condicional (BOLLERSLEV, 1986; BAILLIE; MYERS, 1991; J.P. MORGAN, 1996); e (iii) identificar quantitativamente - por meio de avaliação *walk-forward* e métricas econômicas - as condições sob as quais o hedge deixa de ser economicamente viável, isto é, quando o ganho marginal de proteção não compensa o custo líquido e a perda de eficiência do portfólio. Ao fazer isso, a tese busca preencher uma lacuna aplicada importante: transformar extensões teóricas já consolidadas na literatura em um diagnóstico operacional e economicamente interpretável para o ambiente sucroenergético.

1.4 HIPÓTESES DE PESQUISA

A construção do modelo de decisão de hedge, apresentada nas seções seguintes, parte da ideia de aproximar o problema teórico da realidade enfrentada pelas usinas sucroalcooleiras. Para isso, relaxam-se hipóteses de mercados sem fricções, reconhecendo a existência de custos de corretagem associados ao uso de derivativos, de restrições financeiras e de oportunidades de aplicação em ativos alternativos, bem como a influência da forma como o risco é percebido e da aversão ao risco do produtor. A partir desse arcabouço, são formuladas as hipóteses que orientam a investigação empírica.

As hipóteses do estudo podem ser sintetizadas da seguinte forma:

- 1) As razões de hedge ótimas são inversamente proporcionais aos custos de corretagem associados ao uso de derivativos
- 2) As razões de hedge ótimas são inversamente proporcionais ao nível de renda investida no ativo alternativo;
- 3) À medida que a percepção do risco se baseia em medidas mais sensíveis a perdas do que a variância simples dos retornos do mercado spot, a razão de hedge ótima tende a se reduzir;
- 4) Quanto maior for o coeficiente de aversão ao risco do investidor, maiores serão as razões de hedge ótimas.

Vale notar que tanto os custos de corretagem quanto o investimento em ativos alternativos operam por um mesmo canal econômico: ambos reduzem o montante de riqueza disponível para a combinação entre posição física e posição em derivativos. As Hipóteses 1 e 2, portanto, exploram dimensões distintas de um mesmo mecanismo de realocação de recursos, permitindo avaliar como fricções de mercado e alternativas de aplicação concorrem com o hedge tradicional.

1.5 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

Objetivo geral

Investigar como o relaxamento de hipóteses do modelo tradicional de razão ótima de hedge (mínima variância) altera a decisão ótima de cobertura nos mercados futuros de açúcar e etanol, considerando fricções operacionais, alternativas de alocação de riqueza e preferências do produtor.

Objetivos específicos

- 1) Estimar razões ótimas de hedge sob diferentes especificações de preferência (ARRC) e medidas de risco (variância, LPM com distintos targets);
- 2) Avaliar o impacto de custos de transação (cenários LOW, BASE, HIGH) e da alocação em ativo alternativo sobre a razão ótima;
- 3) Comparar o desempenho das estratégias alternativas com o benchmark de mínima variância, utilizando métricas de bem-estar (Equivalente-Certo e ΔCE) e avaliação fora da amostra (*walk-forward*);
- 4) Identificar as combinações de parâmetros (custos, aversão ao risco, participação do ativo alternativo) sob as quais o hedge se torna economicamente inviável.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a contextualização do setor sucroenergético, o problema de pesquisa, as hipóteses e os objetivos do estudo. O

Capítulo 2 revisa a literatura sobre hedge em commodities, razão ótima de hedge e suas extensões, discutindo limitações do paradigma tradicional e posicionando a contribuição do trabalho. O Capítulo 3 descreve a base de dados, a modelagem de risco condicional, a formulação do problema de decisão com utilidade (ARRC) e medidas *downside* (LPM), bem como as fricções e o desenho empírico fora da amostra. O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados, incluindo a análise de bem-estar via Equivalente-Certo e ΔCE e verificações de robustez. Por fim, as Considerações Finais sintetizam os principais achados, contribuições, limitações e possíveis extensões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para compreender a decisão de hedge em commodities e, em particular, sua aplicação ao setor sucroenergético. Inicialmente, discute-se o hedge como instrumento de gestão de risco no agronegócio, destacando a evolução e o papel dos mercados de derivativos na transferência de risco e na estabilização de receita e fluxo de caixa. Em seguida, são descritos os principais instrumentos e aspectos operacionais - contratos a termo, futuros e opções - bem como seus participantes, distinguindo hedgers e especuladores e a fronteira conceitual entre proteção e tomada de risco. Ao final, o capítulo prepara o leitor para a discussão da razão ótima de hedge, suas extensões e condicionantes, enfatizando que a decisão de cobertura, no caso de açúcar e etanol, é fortemente influenciada por elementos como risco de base, liquidez, custos operacionais e exposição cambial.

2.1 HEDGE EM COMMODITIES AGRÍCOLAS

A gestão de risco nas empresas do agronegócio consiste em reconhecer e administrar incertezas inerentes à atividade, em especial aquelas associadas à variabilidade de preços e de margens, que afetam diretamente o planejamento de produção, a tomada de decisão comercial e a capacidade de honrar compromissos financeiros. Em setores marcados por sazonalidade, exposição a choques climáticos e elevada sensibilidade a condições macroeconômicas, mecanismos de proteção tornam-se relevantes não apenas como instrumentos financeiros, mas como parte do arcabouço de resiliência empresarial e de continuidade operacional (CARVALHO, 1996; SAUNDERS, 2000; ORSOLINI, 2000). No cenário brasileiro, mudanças institucionais e macroeconômicas também ampliaram a relevância da discussão sobre estratégias de proteção, à medida que produtores passaram a operar em ambiente de maior volatilidade e concorrência, com maior necessidade de disciplina de caixa e previsibilidade de receitas (SILVA et al., 2008).

Em tradução literal, hedge significa proteção; no contexto de mercados futuros, designa a estratégia de assumir uma posição em derivativos oposta à posição detida no mercado físico, reduzindo a exposição a variações indesejadas de preços (JOHNSON, 1960). Em termos econômicos, o hedge pode ser entendido como a montagem de posições compensatórias: perdas no mercado físico tendem a ser parcialmente compensadas por ganhos no derivativo (ou vice-versa), trocando-se parte do potencial de ganhos por maior estabilidade de receita e menor variância do fluxo de caixa - aspecto particularmente valioso para agentes com obrigações financeiras, investimentos recorrentes e elevada sazonalidade (JOHNSON, 1960; HULL, 2005). No caso desta tese, o hedge é tratado como instrumento para reduzir a variabilidade do resultado econômico de produtores/usinas expostos aos preços de açúcar e etanol, em um contexto no qual decisões comerciais e financeiras são condicionadas por custo de capital, restrições operacionais e necessidade de liquidez (MENDES, 2010).

Embora existam instrumentos privados e institucionais de mitigação de risco (como seguros, contratos bilaterais e políticas públicas), contratos futuros e opções se destacam em commodities agrícolas por padronização, transparência e liquidez relativa em bolsas organizadas, influenciando a eficiência e o custo de implementação da estratégia (FARHI, 1999; HULL, 2005). No caso do açúcar, o contrato futuro internacional mais utilizado como referência é o Sugar No. 11, negociado na ICE, cuja padronização e características contratuais o tornam benchmark amplamente empregado em estratégias de proteção e precificação (ICE, 2025). A seleção do instrumento, portanto, deve ser coerente com o objetivo econômico da cobertura e com as restrições práticas do agente, incluindo o custo total da estratégia e sua viabilidade operacional (MENDES, 2010; HULL, 2005).

Do ponto de vista operacional, a mecânica de contratos futuros e opções pode ser sintetizada sem perda do essencial para o argumento desta tese. Nos futuros, a presença de

câmara de compensação e mecanismos de garantia mitigam o risco de crédito entre as partes, mas introduzem exigências de margem e liquidação diária de ganhos e perdas (*mark-to-market*), o que cria uma dimensão financeira relevante: mesmo uma estratégia de hedge bem desenhada pode demandar liquidez para suportar chamadas de margem em períodos de estresse (HULL, 2005). Nas opções, por sua vez, há o pagamento do prêmio como custo explícito da proteção e a assimetria de *payoff* (direito sem obrigação), alterando o *trade-off* entre redução de risco e custo líquido (HULL, 2005). Para detalhes sobre padronização contratual, margem, ajuste diário e precificação, remete-se a Hull (2005), mantendo-se aqui o foco nas implicações econômicas para a decisão de cobertura.

Para compreender a dinâmica desse mercado, é importante distinguir hedgers e especuladores. Hedgers utilizam o mercado de derivativos para proteger uma posição existente no físico, ao passo que especuladores buscam retorno a partir de oscilações de preços sem necessariamente deter o ativo físico (ANDERSON; DANTHINE, 1981). A literatura reconhece que a fronteira entre hedge e especulação pode não ser nítida, dado que o timing e o tamanho das posições podem aproximar estratégias de proteção de comportamentos especulativos (WORKING, 1953). Para esta tese, contudo, a distinção relevante é econômica e operacional: interessa avaliar como a cobertura altera a variabilidade de resultados e o custo líquido de implementação, especialmente quando o agente enfrenta restrições de liquidez, fricções e custos de transação (HULL, 2005; MENDES, 2010).

No setor sucroenergético, a discussão sobre hedge em commodities agrícolas assume contornos específicos. A exposição ao risco envolve (i) risco de preço do açúcar e do etanol; (ii) risco cambial, dada a influência do BRL/USD sobre preços domésticos e sobre a competitividade das exportações; e (iii) risco de base (*basis risk*), pois o preço efetivamente recebido no mercado físico pode divergir da referência usada no derivativo, por diferenças de

qualidade, praça, prazos e custos logísticos (HULL, 2005). No caso do açúcar, esse ponto é particularmente central: na prática, parte relevante da referência de hedge se ancora no contrato internacional (ICE nº 11), enquanto a receita doméstica é formada por condições internas e por prêmios/descontos locais. Evidências de mercado discutidas em boletins setoriais mostram que o preço interno pode se descolar da referência externa (paridade) em diferentes momentos, refletindo condições domésticas de oferta e demanda, dinâmica logística e formação de prêmios regionais - o que reforça a necessidade de tratar o risco de base como componente efetivo do problema de proteção, e não como detalhe residual (CEPEA, 2025).

Além disso, a decisão do mix de produção (açúcar versus etanol) introduz flexibilidade gerencial que pode atuar como um “hedge operacional” parcial, ao alterar a exposição da usina entre mercados; porém, essa flexibilidade não elimina a necessidade de proteção financeira em cenários de elevada volatilidade, restrições de crédito ou necessidade de previsibilidade de caixa. Para o etanol, embora existam contratos futuros domésticos, a literatura institucional de mercado e estatísticas operacionais indicam baixa liquidez relativa em diversos períodos, com volumes e contratos em aberto modestos quando comparados a mercados mais maduros, o que tende a elevar custos implícitos (spread e impacto de mercado) e dificultar a execução de estratégias em escala (B3, 2025). Assim, no contexto sucroenergético, a decisão de hedge precisa ser entendida como escolha econômica sob fricções: o instrumento disponível pode ser imperfeito (risco de base), mais custoso (liquidez) e financeiramente exigente (margem/rolagem), fatores que dialogam diretamente com as extensões discutidas nas próximas seções.

Dado esse contexto, torna-se necessário formalizar como a literatura define e estima a razão ótima de hedge, bem como quais extensões são propostas quando se incorporam retorno esperado, preferências e medidas alternativas de risco. A Seção 2.2 apresenta o modelo

tradicional de mínima variância e suas principais extensões, estabelecendo a base analítica para as formulações empregadas nos capítulos metodológico e empírico.

2.2 RAZÃO ÓTIMA DE HEDGE: MÍNIMA VARIÂNCIA E EXTENSÕES

A razão ótima de hedge sintetiza o problema central deste estudo: quanto da exposição no mercado físico deve ser coberta no mercado de derivativos para produzir o melhor resultado segundo um critério de decisão. Em termos de teoria econômica, trata-se de um problema de escolha sob incerteza, em que o produtor equilibra proteção e eventuais *trade-offs* de retorno. Johnson (1960) inaugurou a formalização do problema ao demonstrar como a posição em futuros pode ser combinada com a posição física para reduzir a variância da receita. Em formulações clássicas, o produtor escolhe uma posição vendida em futuros que compense a variabilidade do preço à vista no momento de comercialização (JOHNSON, 1960; HULL, 2005).

2.2.1 Modelo de mínima variância: formulação e interpretação econômica

A formalização clássica da razão ótima de hedge parte da ideia de que o agente exposto ao risco de preço no mercado físico pode reduzir a variabilidade de sua receita ao assumir uma posição oposta no mercado futuro. Johnson (1960) e Stein (1961) foram pioneiros ao estruturar esse problema de decisão e mostrar como a posição em futuros pode ser combinada com a posição no físico para reduzir risco. No arcabouço tradicional, o objetivo do hedger é escolher a posição em futuros que minimiza a variância do resultado (ou retorno) da posição conjunta físico–futuro (JOHNSON, 1960; STEIN, 1961; EDERINGTON, 1979; HULL, 2005).

Considere um produtor/usina que detém uma exposição no mercado físico equivalente a N_S unidades do ativo (por exemplo, uma quantidade de açúcar a ser comercializada) e que, no momento 1, abre uma posição vendida em N_F contratos futuros a preço F_1 . No momento 2, a receita no mercado físico é obtida pela venda a preço S_2 e a posição em futuros é encerrada pela

recompra a preço F_2 . Assim, as receitas no mercado físico e no mercado futuro no momento 2 são dadas por:

$$R_S = N_S * S_2 \quad (1)$$

$$R_F = N_F * (F_1 - F_2) = -N_F * (F_2 - F_1) \quad (2)$$

e, portanto, a receita total é:

$$R = N_S * S_2 - N_F * (F_2 - F_1) \quad (3)$$

Define-se a razão de hedge como a proporção entre a posição em futuros e a exposição física, isto é,

$$h = \frac{N_F}{N_S} \quad (4)$$

De forma equivalente, em notação de variações (ou retornos), o problema pode ser interpretado como a escolha de h para minimizar a variância do resultado hedgado associado às variações de preço no período, de modo que a solução de mínima variância resulta na expressão bem conhecida:

$$h^* = \frac{Cov(\Delta S, \Delta F)}{Var(\Delta F)} \quad (5)$$

em que ΔS representa a variação do preço no mercado físico e ΔF a variação do preço do contrato futuro utilizado no hedge. Essa razão ótima é diretamente afetada pelo risco de base, isto é, pela imperfeição na relação entre o preço efetivo do físico e o preço do instrumento de hedge (HULL, 2005). Quando a correlação entre ΔS e ΔF é elevada, a covariância aumenta relativamente à variância do futuro e o hedge ótimo tende a ser maior; quando a relação é fraca (basis instável), o hedge ótimo tende a ser menor.

No plano empírico, a literatura consolidou a estimação de h via regressão linear entre variações do spot e do futuro. Uma representação operacional comum é:

$$\Delta S_t = \alpha + h \cdot \Delta F_t + \varepsilon_t \quad (6)$$

Sob as hipóteses usuais do modelo clássico, o estimador de mínimos quadrados ordinários para h coincide com a solução de mínima variância, isto é, $\hat{h} = \text{Cov}(\Delta S, \Delta F) / \text{Var}(\Delta F)$. Myers e Thompson (1989) discutem, contudo, que regressões simples podem produzir estimativas imprecisas quando se ignora a dinâmica temporal e propõem uma generalização em séries temporais, reforçando que especificações com estrutura dinâmica podem ser mais adequadas em ambientes com persistência e heterocedasticidade - características típicas em commodities (MYERS; THOMPSON, 1989).

Do ponto de vista econômico, h^* possui interpretação direta: $h^* = 0,7$ significa que a estratégia ótima, sob o critério de mínima variância, recomenda cobrir aproximadamente 70% da exposição física. Para uma usina com exposição equivalente a 10.000 toneladas (em unidade compatível com o contrato), isso se traduz, em termos aproximados, em uma posição em futuros equivalente a 7.000 toneladas (ajustada pelo tamanho do contrato e pela forma de conversão adotada). Em outras palavras, o modelo não recomenda zerar o risco necessariamente; ele recomenda o nível de hedge que melhor equilibra a redução da variância dada a imperfeição do instrumento (basis) e a dinâmica de co-movimento entre físico e futuro. Quando h^* se aproxima de zero, a leitura econômica é que o futuro utilizado não está oferecendo ganho relevante de redução de variância para aquela exposição (por baixa covariância, alta variância do futuro e/ou basis instável). Quando h^* é elevado (próximo de 1), indica que a proteção via futuro é mais efetiva do ponto de vista estatístico.

2.2.2 Extensões: retorno esperado, utilidade e medidas de risco assimétricas

Outra crítica recorrente na literatura econômica está relacionada ao fato de que a razão de hedge de mínima variância ignora o retorno esperado do portfólio hedgeado. Leuthold, Junkus e Cordier (1989) propõem uma abordagem que considera simultaneamente a média e a variância do portfólio composto pelas posições no mercado físico e no mercado futuro,

conectando o problema à análise de média–variância e ao arcabouço de Markowitz (1952). Nesse contexto, a decisão de hedge deixa de ser interpretada apenas como minimização de dispersão e passa a ser compreendida como parte de um *trade-off* risco–retorno: o produtor pode aceitar um pouco mais de variabilidade se isso elevar o retorno esperado da estratégia líquida (LEUTHOLD; JUNKUS; CORDIER, 1989; MARKOWITZ, 1952).

A análise média–variância, de acordo com Chen, Lee e Shrestha (2003) e Meyer (1987), pode ser associada à utilidade esperada da riqueza final em formulações que aproximam decisões sob incerteza por meio de momentos (média e desvio padrão/variância). Essa conexão é atraente por sua interpretação e simplicidade operacional, mas depende de restrições relevantes. Ingersoll (1987) destaca que, para que haja consistência geral entre utilidade esperada e média–variância, é necessário impor hipóteses sobre as preferências dos agentes e/ou restringir o conjunto de variáveis aleatórias a famílias específicas de distribuição. Collins e Gbur (1991) criticam ainda a adoção indiscriminada de funções de utilidade quadráticas definidas por média e variância, argumentando que propriedades racionais como monotonicidade e não saciedade podem ser violadas em partes do domínio sem restrições adicionais. Assim, a compatibilidade entre forma funcional, distribuição dos retornos e critério de risco torna-se um ponto central para a interpretação econômica dos resultados de hedge (MEYER, 1987; INGERSOLL, 1987; COLLINS; GBUR, 1991; CHEN; LEE; SHRESTHA, 2003).

Além do retorno esperado, há também limitações ligadas ao próprio conceito de risco no modelo tradicional: ao penalizar simetricamente desvios positivos e negativos, a variância pode não refletir adequadamente o objetivo econômico de agentes que atribuem peso maior a resultados adversos (perdas) do que a ganhos. Como essa discussão envolve medidas de risco assimétricas e critérios orientados à cauda (*downside*), ela é tratada de forma sistemática na

Seção 2.3, em que se discutem aversão ao risco e medidas parciais como alternativa ao arcabouço estritamente baseado em variância.

2.3 AVERSÃO AO RISCO, DOWNSIDE RISK E MEDIDAS PARCIAIS

A seção anterior apresentou o modelo tradicional de razão ótima de hedge e discutiu extensões associadas ao retorno esperado e à utilidade, ressaltando que o resultado depende de como se define risco e de quais preferências estão implicitamente embutidas no critério de decisão. Em commodities agrícolas, e particularmente no setor sucoenergético, a decisão de hedge é tomada por agentes avessos ao risco, com preocupações centrais sobre perdas e fluxo de caixa em cenários adversos, além de restrições financeiras e operacionais. Nesse contexto, torna-se necessário explicitar (i) as preferências do agente via aversão ao risco e (ii) medidas de risco que capturem assimetria, em vez de depender exclusivamente de medidas simétricas como a variância (MARKOWITZ, 1952; MEYER, 1987; CHEN; LEE; SHRESTHA, 2003).

2.3.1 Aversão ao risco e utilidade esperada

A teoria da decisão sob incerteza estabelece que, quando os resultados futuros são incertos, a escolha ótima do agente pode ser descrita como a maximização da utilidade esperada de sua riqueza (ou de seu retorno), em que a função utilidade traduz formalmente preferências e aversão ao risco. O uso de uma função utilidade permite expressar de maneira consistente a ideia de que agentes preferem trajetórias mais estáveis e, em geral, penalizam combinações de risco e retorno de forma não linear. No contexto do hedge, essa formalização é particularmente relevante porque diferentes estratégias podem produzir distribuições com o mesmo retorno médio, porém com comportamento distinto na cauda inferior - e essas diferenças são economicamente relevantes quando há restrições de liquidez, obrigações financeiras e aversão a perdas (PRATT, 1964; ARROW, 1965).

A aversão ao risco pode ser caracterizada pelas medidas clássicas de Arrow–Pratt, que relacionam a curvatura da utilidade ao grau de repulsa do agente a incertezas. Em termos práticos, quanto maior a aversão ao risco, maior é o valor atribuído à redução de variabilidade e, sobretudo, maior é o peso atribuído a cenários desfavoráveis. Assim, ao incorporar preferências ao problema de hedge, o resultado deixa de ser uma regra puramente estatística e passa a refletir o *trade-off* econômico entre proteção, desempenho e custos.

Para representar essas preferências de maneira parcimoniosa e comparável entre perfis, este trabalho adota uma função utilidade com aversão relativa ao risco constante (ARRC). Mantendo a notação utilizada ao longo da tese, a utilidade em função do retorno da carteira x pode ser escrita como:

$$U(x) = \frac{(1+x)^{1-\gamma}-1}{1-\gamma}, \gamma > 0 \quad (7)$$

em que x denota o retorno da carteira e γ é o coeficiente de aversão ao risco.

Valores mais elevados de γ indicam maior penalização de resultados desfavoráveis e maior preferência por trajetórias de riqueza mais estáveis. Esse arcabouço é coerente com a discussão de consistência entre utilidade esperada e critérios baseados em momentos (MEYER, 1987; INGERSOLL, 1987; COLLINS; GBUR, 1991) e com aplicações em hedge que ressaltam a importância de compatibilizar forma funcional e distribuição dos retornos (NELSON; ESCALANTE, 2004; CHEN; LEE; SHRESTHA, 2003).

2.3.2 *Downside risk*, semivariância e LPM

Apesar de a utilidade fornecer uma forma geral de incorporar preferências, a escolha da medida de risco utilizada no critério de decisão permanece determinante. A crítica clássica ao uso da variância é que ela penaliza de forma simétrica desvios positivos e negativos em torno de um valor esperado, ainda que, para muitos hedgers, o risco economicamente relevante esteja associado principalmente a perdas - isto é, a resultados abaixo de um patamar mínimo que

comprometam margens e liquidez (MARKOWITZ, 1952). Markowitz (1952) reconheceu essa limitação e propôs a semivariância como alternativa focada no comportamento da distribuição abaixo de um alvo, deslocando a análise da dispersão total para a parte ruim da distribuição. Em aplicações ao hedge, essa distinção é especialmente importante: em vez de reduzir variância, o objetivo econômico pode ser reduzir probabilidade e severidade de perdas, o que sugere medidas que tratem a cauda inferior com maior ênfase.

Fishburn (1977) e Bawa (1978) generalizaram a semivariância ao introduzir os momentos parciais inferiores (*Lower Partial Moments – LPM*), que permitem representar diferentes sensibilidades ao downside por meio de dois componentes: (i) o alvo (target) τ e (ii) a ordem do momento n . Mantendo a notação que será utilizada no Capítulo 3, uma forma geral de definir o LPM é como a esperança do desvio abaixo do alvo, considerando apenas as realizações em que o retorno fica inferior a τ . Assim, para um retorno aleatório R , o LPM de ordem n em relação ao alvo τ pode ser escrito como:

$$LPM_n(\tau) = E[(\min(0, R - \tau))^n], n \geq 0 \quad (8)$$

e, em termos amostrais, para uma sequência de retornos r_t em uma janela de tamanho T , tem-se:

$$\widehat{LPM}_n(\tau) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\min(0, r_t - \tau))^n \quad (9)$$

O mecanismo de assimetria é direto: quando $r_t \geq \tau$, o termo $\min(0, r_t - \tau) = 0$ e, portanto, não há contribuição para o risco; quando $r_t < \tau$, a diferença é negativa e passa a ser penalizada conforme a ordem n . A escolha de n controla o formato da penalização: $n = 0$ está associado a uma noção de frequência de quedas abaixo do alvo; $n = 1$ mede, de forma linear, o desvio médio abaixo do alvo; e $n = 2$ impõe penalização quadrática sobre perdas, aproximando-se de uma lógica semelhante à variância, porém restrita ao *downside* (FISHBURN, 1977; BAWA, 1978; HARLOW; RAO, 1989; UNSER, 2000). Por essa razão, o

uso de LPM_2 é especialmente conveniente no hedge: ele preserva a intuição de penalizar mais perdas maiores, mas concentra o foco apenas na parte da distribuição que representa eventos desfavoráveis.

No contexto do hedge, medidas baseadas em *downside* podem alterar a razão ótima não por contradição estatística, mas por mudança do objeto econômico: o critério deixa de medir dispersão total e passa a medir perdas em relação a um patamar mínimo. Em aplicações, isso tende a produzir níveis de hedge distintos dos obtidos por mínima variância, sobretudo em ambientes com caudas pesadas, assimetria e mudanças de regime - características frequentes em séries de commodities e câmbio. Lien e Tse (2000) e Chen, Lee e Shrestha (2003) mostram que a adoção de medidas *downside* e de objetivos orientados à cauda inferior pode alterar a estratégia ótima, reforçando que qual risco se mede é tão importante quanto como se estima a covariância.

Um elemento central do LPM é o alvo τ . Esse parâmetro define explicitamente o que o agente entende como resultado ruim e, portanto, traduz de forma transparente a preocupação econômica subjacente: evitar retornos negativos, evitar resultados abaixo do típico ou proteger-se contra cenários adversos extremos. Em problemas de hedge, escolhas usuais para τ incluem $\tau = 0$ (retorno nulo, evitando perdas), medidas centrais como a mediana (P50) e percentis inferiores (por exemplo, P25 e P10), que deslocam o foco para regiões cada vez mais adversas da distribuição (HARLOW; RAO, 1989; UNSER, 2000). Nesta tese, considera-se $\tau \in \{0, P50, P25, P10\}$ como forma de representar diferentes níveis de conservadorismo no objetivo de proteção.

A interpretação econômica é direta. Quando $\tau = 0$, o risco *downside* reflete exclusivamente resultados negativos, alinhando-se a uma noção intuitiva de evitar perda. Quando $\tau = P50$, o alvo passa a representar um patamar interno típico da própria distribuição,

de modo que o modelo penaliza com mais frequência episódios abaixo da mediana - o que pode ser relevante se o objetivo for reduzir o número e a intensidade de desempenhos “abaixo do esperado” no sentido operacional. Já alvos como P25 e P10 deslocam a referência para regiões mais baixas da distribuição e tornam o objetivo mais voltado a cenários adversos: nesses casos, a penalização concentra-se em eventos de cauda, compatíveis com a preocupação em evitar episódios de estresse que comprometam margens e caixa. No setor sucroenergético, onde a gestão de risco frequentemente dialoga com restrições de crédito, custo de capital e necessidade de liquidez, essa parametrização é útil para mapear como a decisão ótima reage quando se impõe um objetivo de proteção mais defensivo contra cenários de queda.

Importa ressaltar que τ não é mero detalhe estatístico: ele altera o conjunto de realizações classificadas como desfavoráveis e, conseqüentemente, altera o incentivo marginal ao hedge. Em particular, quando o alvo se desloca para percentis mais baixos, o modelo tende a concentrar-se em eventos menos frequentes, porém mais severos; quando o alvo é mais central, o critério passa a classificar como abaixo do alvo uma fração maior das observações, o que pode gerar diferenças sistemáticas na escolha ótima a depender do formato da distribuição e da dinâmica dos retornos. Essa flexibilidade é precisamente o que torna o LPM um instrumento útil na análise de hedge: ele permite que o conceito de risco seja calibrado ao objetivo econômico do agente, mantendo uma interpretação transparente e coerente com preocupações operacionais.

Por fim, cabe notar que esta seção tem caráter conceitual: ela estabelece porque a incorporação de preferências explícitas (via γ) e de medidas de risco orientadas ao *downside* (via $LPM_2(\tau)$) é relevante para decisões de hedge e, conseqüentemente, fundamenta as hipóteses do estudo relacionadas ao papel da aversão ao risco e do alvo de perdas na determinação da cobertura ótima. Em particular, ao permitir que o risco seja definido em torno

de um patamar τ (por exemplo, 0, $P50$, $P25$ ou $P10$), o modelo cria um mecanismo direto para testar se targets mais conservadores e maior sensibilidade a perdas tendem a produzir decisões de hedge mais defensivas - e, em cenários de maior fricção, potencialmente mais restritivas. A operacionalização dessas hipóteses - isto é, a forma como $LPM_2(\tau)$ é combinado ao retorno do portfólio e como se determina a razão ótima h^* sob restrições e fricções - é apresentada no Capítulo 3, onde se formaliza a função-objetivo e os procedimentos empíricos utilizados na tese.

2.4 CUSTOS DE TRANSAÇÃO, FRICÇÕES OPERACIONAIS E ATIVO ALTERNATIVO

A decisão ótima de hedge não depende apenas das relações estatísticas entre preços à vista e futuros ou da forma como o risco é mensurado (variância versus *downside*). Em mercados reais, o hedger enfrenta fricções que afetam o custo líquido de implementação e, portanto, a atratividade econômica da estratégia. Nesse sentido, a literatura que relaxa hipóteses do modelo tradicional mostra que a razão ótima de hedge pode ser substancialmente comprimida quando se incorporam custos de transação e restrições operacionais, podendo inclusive colapsar para valores próximos de zero quando o custo marginal de proteger supera o benefício marginal de reduzir risco (LENCE, 1996; MATTOS; GARCIA; NELSON, 2008; CRUZ JÚNIOR, 2009). Para o setor sucroenergético, essas fricções são particularmente relevantes por duas razões: (i) a execução e manutenção do hedge tipicamente requerem disciplina operacional (rolagem e ajustes) e disponibilidade de caixa (margem), e (ii) a estratégia de hedge compete com alternativas de gestão de liquidez e aplicação financeira.

De forma ampla, custos e fricções podem ser classificados em componentes diretos e indiretos. Os diretos incluem corretagem, emolumentos e taxas explícitas cobradas pela bolsa/corretora; os indiretos incluem *spread* de compra e venda, impacto de mercado (*price impact*), *slippage*, custos associados à baixa liquidez e custos vinculados a exigências

financeiras e operacionais - como a necessidade de manter margem, responder a chamadas de margem e rolar contratos ao longo do tempo (HULL, 2005). Em commodities, a rolagem é particularmente importante porque o hedge raramente é *buy-and-hold*: quando o objetivo é cobrir exposição ao longo de meses, o agente precisa migrar o contrato conforme se aproxima o vencimento, gerando custos adicionais recorrentes e, em alguns casos, amplificando o peso de fricções em estratégias que exigem ajustes frequentes.

Para tornar essa discussão operacional e compatível com a avaliação empírica desta tese, é útil apresentar ordens de grandeza em termos de custos proporcionais (bps) por evento de negociação. Na prática, o custo total por ajuste pode ser representado como a soma de: (i) um componente relativamente estável de corretagem + emolumentos (*round-turn*), (ii) um componente de spread/impacto associado à execução, e (iii) componentes operacionais vinculados ao turnover (mudança de h entre rebalanceamentos) e à rolagem (troca de vencimentos sob a regra adotada). Em termos ilustrativos, e alinhado ao desenho empírico do Capítulo 3, uma parametrização plausível no contexto do setor pode assumir um custo fixo total na ordem de 10–20 bps por operação (corretagem e emolumentos), somado a um custo de execução (spread/impacto) que varia por instrumento e liquidez - por exemplo, na ordem de 2–5 bps para instrumentos líquidos e potencialmente maior em instrumentos menos líquidos. Assim, um custo “BASE” pode ser pensado como algo em torno de 18 bps por ajuste para uma estratégia concentrada no hedge de açúcar, enquanto cenários “LOW” e “HIGH” podem ser obtidos por escalonamento proporcional (por exemplo, 50% e 150% do BASE), permitindo avaliar como a decisão ótima responde ao aumento ou redução de fricções. Essa lógica é consistente com a literatura que enfatiza que custos, mesmo quando aparentemente pequenos em bps, podem ter grande impacto no hedge ótimo quando a estratégia exige ajustes repetidos e quando o ganho marginal de proteção é limitado (LENCE, 1996).

Além do nível unitário de custos, importa destacar o mecanismo pelo qual fricções reduzem h^* . Quando custos incidem sobre o turnover, estratégias que variam h com maior intensidade ao longo do tempo tornam-se mais caras; quando custos incidem sobre rolagem, estratégias com h mais elevado tendem a pagar mais vezes para manter a proteção ao longo do horizonte. Em ambos os casos, o critério de decisão passa a incorporar um *trade-off* mais realista entre proteção e custo líquido: um hedge estatisticamente eficaz pode deixar de ser economicamente desejável se seu benefício marginal for consumido por custos de implementação. Esse argumento fundamenta diretamente a Hipótese 1 do estudo: a presença de custos de transação e fricções operacionais reduz a razão ótima de hedge, podendo tornar a estratégia parcial ou inviável em cenários de maior fricção, especialmente quando se exige manutenção e rolagem ao longo do tempo (LENCE, 1996; MATTOS; GARCIA; NELSON, 2008).

Uma segunda extensão relevante, também discutida em trabalhos que relaxam hipóteses do modelo tradicional, é reconhecer que o hedger não escolhe apenas quanto hedgear - ele também decide como alocar liquidez e riqueza entre alternativas. Em ambientes com restrições financeiras, é comum que empresas mantenham reservas e aplicações para gestão de caixa, mitigação de risco e flexibilidade operacional. Assim, permitir a alocação em um ativo alternativo introduz competição direta com o hedge: parte da estabilização do portfólio pode ser obtida via diversificação financeira, reduzindo o benefício marginal de ampliar a cobertura em derivativos. Em termos econômicos, o hedge deixa de ser o único instrumento de gestão de risco e passa a competir com a utilidade de manter liquidez e retorno em aplicações alternativas - especialmente quando fricções elevam o custo líquido do hedge.

Na aplicação empírica desta tese, o ativo alternativo adotado é o IBOVESPA (B3), utilizado como proxy de uma alternativa financeira líquida e amplamente observável para

agentes domésticos. A escolha do IBOVESPA se justifica por três motivos: (i) trata-se do principal índice acionário do mercado brasileiro e, portanto, representa uma referência consolidada para alocação financeira; (ii) possui elevada disponibilidade de dados e integração operacional (facilitando comparabilidade e replicabilidade); e (iii) permite representar, de forma parcimoniosa, a presença de uma alternativa de investimento com dinâmica de risco e retorno distinta da commodity, capturando o papel de diversificação e de competição por alocação de riqueza. Dessa forma, ao incorporar w_{alt} como participação do ativo alternativo, o modelo passa a refletir uma escolha realista de gestão de caixa e portfólio, especialmente em setores expostos a ciclos de preços e com demanda por flexibilidade financeira.

Esse mecanismo fundamenta diretamente a Hipótese 2 do estudo: a possibilidade de investir parte da riqueza em um ativo alternativo reduz a razão ótima de hedge, pois parte da estabilização do resultado pode vir da diversificação financeira, diminuindo o ganho marginal de ampliar a posição em futuros. Em particular, para um mesmo ambiente de risco no mercado físico e no derivativo, aumentos de w_{alt} tendem a deslocar a solução ótima para níveis menores de hedge, sobretudo quando os custos de transação são relevantes e quando o retorno do ativo alternativo oferece uma alternativa atrativa do ponto de vista de utilidade (LENCE, 1996; MATTOS; GARCIA; NELSON, 2008; CRUZ JÚNIOR, 2009).

Por fim, esta seção fornece a base conceitual para a forma como custos e ativo alternativo entram na metodologia: o Capítulo 3 operacionaliza fricções por custos proporcionais associados a turnover e rolagem, e avalia cenários exógenos para w_{alt} , permitindo identificar em que condições o hedge permanece economicamente desejável e em quais combinações de custos e competição com alternativas financeiras a solução ótima se comprime ou se aproxima de zero.

2.5 SÍNTESE DA LITERATURA E POSICIONAMENTO DO TRABALHO

A literatura sobre hedge ótimo em commodities agrícolas evolui de um núcleo clássico - em que o objetivo do hedger é reduzir a variabilidade do resultado combinando posições no físico e no futuro - para um conjunto de extensões motivadas por fatos estilizados de mercados reais. A Tabela 1 organiza essa evolução, destacando os trabalhos mais influentes, o critério de risco adotado e as principais dimensões de extensão incorporadas (dinâmica condicional, preferências, fricções e alternativas de investimento). A formulação seminal de Johnson (1960) estabelece o hedge como mecanismo de proteção por posições compensatórias e sustenta o modelo de mínima variância como benchmark. Ederington (1979) consolida a leitura empírica do tema ao discutir efetividade do hedge e reforçar o papel do critério de redução de variância como medida comparativa. No plano operacional, Myers e Thompson (1989) conectam a solução de mínima variância à estimação via regressões em variações, ao mesmo tempo em que enfatizam que especificações simples podem ser frágeis quando a dinâmica temporal, heterocedasticidade e mudanças de regime são relevantes.

Tabela 1 - Síntese da literatura sobre hedge ótimo e extensões relevantes

Estudo	Mercado/Ativo analisado	Contribuição central	Critério/medida	O que esta tese adiciona
Johnson (1960)	Geral (futuros/hedge)	Formaliza o hedge ótimo no benchmark clássico	MV/variância	Aplica ao sucroenergético BR com fricções, ativo alternativo e <i>downside</i>
Ederington (1979)	Geral (efetividade de hedge)	Consolida a comparação empírica via efetividade do hedge	Redução de variância	Complementa com bem-estar OOS ($CE/\Delta CE$) e risco <i>downside</i>
Myers & Thompson (1989)	Geral (estimação do hedge)	Estimação operacional do hedge ótimo via regressão (OLS)	MV (OLS)	Mantém MV como benchmark dentro de um arcabouço ampliado (ARRC-LPM + fricções)
Lence (1996)	Commodities agrícolas	Mostra que custos e ativo alternativo comprimem h^*	Utilidade/decisão	Parametriza fricções (bps; turnover/rolagem) e testa cenários de ativo alternativo

Nelson & Escalante (2004)	Agricultura (arcabouço teórico)	Preferências ARRC aplicadas a problemas <i>location-scale</i>	Utilidade (ARRC)	Integra ARRC + LPM_2 (τ) na decisão de hedge para açúcar/etanol
Lien & Tse (2000)	Futuros (aplicações)	Critérios <i>downside</i> alteram h^* vs MV	<i>Downside</i>	Usa LPM_2 (τ) com targets (0, P50, P25, P10) e interpreta economicamente
Mattos, Garcia & Nelson (2008)	Commodities agrícolas (com custos)	Custos podem inviabilizar hedge em cenários realistas	<i>Downside</i> + utilidade	Mostra o mesmo mecanismo no sucro e mede ganhos por $CE/\Delta CE$ fora da amostra
Cruz Júnior (2009)	Boi gordo (Brasil)	Uso de momentos parciais inferiores em hedge ótimo	<i>Downside</i> (LPM/MPI)	Generaliza para o sucro e adiciona fricções + ativo alternativo + OOS
Calderon (2001)	Açúcar (BM&F)	Evidência aplicada de hedge/cross-hedge no açúcar	Aplicado	Leva ao nível normativo: h^* sob ARRC-LPM e custos operacionais
Silva; Neto; Machado (2016)	Açúcar (Brasil)	Evidência aplicada de hedge/risco de preço no açúcar	Aplicado	Conecta evidência setorial a um modelo integrado com fricções e bem-estar OOS
Santos (2017)	Setor sucro (açúcar/etanol)	Evidência de relações/efetividade entre mercados	Efetividade/aplicado	Converte efetividade em critério econômico (CE) e decisão ótima sob restrições

Fonte: Estudos mencionados. Elaboração própria.

Esse ponto se torna especialmente importante em commodities e câmbio, onde a evidência de heterocedasticidade condicional e correlações variáveis ao longo do tempo é recorrente. Nesse contexto, modelos de risco condicional passam a ser utilizados para permitir que o hedge responda a regimes distintos de volatilidade e co-movimento. A contribuição de Bollerslev (1986) ao formalizar a classe GARCH fornece base para modelar volatilidades condicionais, enquanto abordagens como a família RiskMetrics (J.P. Morgan, 1996) oferecem um caminho parcimonioso para correlações/covariâncias dinâmicas. Trabalhos como Baillie e Myers (1991) exemplificam essa transição ao tratar o hedge como decisão baseada em

momentos condicionais, aproximando o modelo da realidade de mercados com clusters de volatilidade.

Em paralelo, a literatura também relaxa hipóteses econômicas substantivas do modelo tradicional. Um primeiro relaxamento central é reconhecer que o hedge tem custo e que o ambiente possui fricções: corretagem, emolumentos, spread, impacto de mercado, rolagem e custos de ajuste de posição podem reduzir o ganho líquido da proteção e alterar a solução ótima. Lence (1996) é referência nessa direção ao incorporar explicitamente custos e a possibilidade de alocação em um ativo alternativo, mostrando que o hedge ótimo pode ser comprimido quando proteção e diversificação competem. Em um segundo relaxamento, questiona-se a adequação da variância como medida universal de risco, pois ela penaliza simetricamente desvios positivos e negativos. Essa crítica motiva o uso de medidas orientadas ao *downside* e critérios sensíveis a perdas, como discutem, por exemplo, Lien e Tse (2000) e Chen, Lee e Shrestha (2003). Trabalhos aplicados que combinam relaxamentos - custos/fricções e medidas de risco alternativas - reforçam que a atratividade econômica do hedge pode se reduzir de forma acentuada quando se internaliza o custo líquido de implementação, chegando a inviabilizar a estratégia em determinados cenários (Mattos, Garcia e Nelson, 2008; Cruz Júnior, 2009).

No setor sucroenergético brasileiro, embora exista literatura que discute risco, derivativos e relações de mercado associadas a açúcar e etanol, em geral os estudos se concentram em recortes específicos (por exemplo, relações de preços, efetividade do hedge sob critérios tradicionais ou discussões institucionais/operacionais), sem integrar, em um mesmo arcabouço normativo, preferências explícitas, risco *downside*, fricções operacionais e avaliação econômica fora da amostra. Essa lacuna é relevante porque o ambiente sucroenergético combina: risco de preço (açúcar/etanol), componente cambial, risco de base, restrições de liquidez e rolagem

operacional - condições sob as quais a decisão ótima tende a ser fortemente condicionada por custos e por objetivos de proteção focados na cauda inferior da distribuição.

É nesse ponto que esta tese se posiciona de forma positiva e delimitada: no contexto do setor sucroenergético brasileiro, entre os poucos estudos aplicados a açúcar/etanol com enfoque de decisão de carteira, esta tese se distingue por integrar, em um único arcabouço empírico, (i) preferências ARRC, (ii) medidas de risco orientadas ao *downside* via $LPM_2(\tau)$ com múltiplos targets, (iii) fricções operacionais e custos de transação associados a turnover e rolagem, (iv) competição com alternativa de alocação financeira (ativo alternativo), e (v) avaliação fora da amostra com métrica econômica de bem-estar (Equivalente-Certo e ganhos marginais de bem-estar). Com isso, o objetivo não é substituir o benchmark de mínima variância, mas estabelecer quando ele é operacionalmente robusto e quando extensões economicamente mais aderentes - sobretudo sob fricções e foco em perdas - alteram a decisão ótima de forma material.

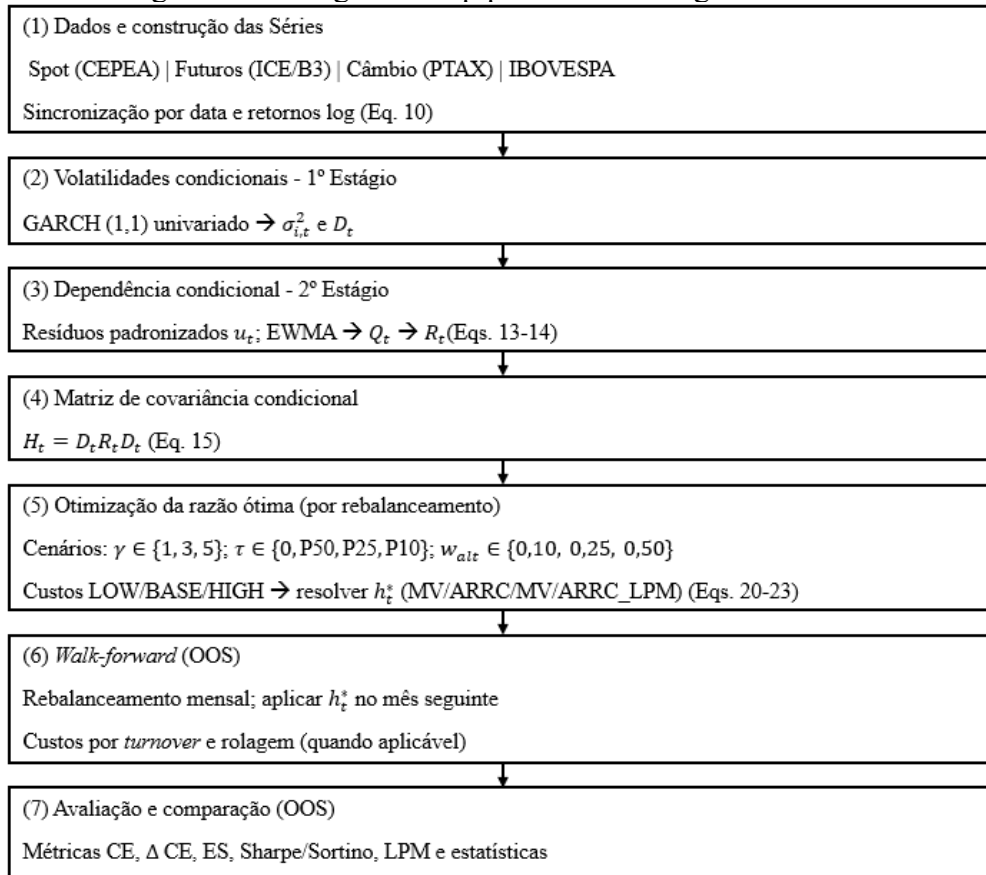
Essa síntese também ajuda a interpretar as hipóteses da tese como desdobramentos diretos da literatura: a incorporação de fricções e custos (Hipótese 1) e de ativo alternativo (Hipótese 2) deriva do relaxamento de hipóteses econômicas (Lence, 1996; Mattos, Garcia e Nelson, 2008; Cruz Júnior, 2009), enquanto a introdução de medidas *downside* e targets τ (Hipóteses associadas ao downside e à aversão ao risco) se apoia no argumento de que a variância pode não capturar adequadamente a preocupação com perdas (Lien e Tse, 2000; Chen, Lee e Shrestha, 2003). Assim, o posicionamento do trabalho é coerente com a evolução da literatura e, ao mesmo tempo, orientado para uma contribuição aplicada: traduzir extensões teóricas consolidadas em diagnóstico operacional e economicamente interpretável para o ambiente sucroenergético.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a estratégia metodológica adotada para avaliar a razão ótima de hedge no setor sucroalcooleiro brasileiro, em coerência com o referencial teórico apresentado. A abordagem parte da construção das séries de dados e das variáveis relevantes, avança para a modelagem da volatilidade e da covariância condicional, formaliza o problema de otimização sob aversão ao risco com medidas de risco assimétricas e incorpora fricções de mercado por meio de custos de corretagem e da possibilidade de investimento em ativo alternativo. Por fim, são detalhados os procedimentos empíricos de estimação e as métricas utilizadas para comparar o desempenho das diferentes estratégias de hedge.

Para facilitar a leitura, a Figura 1 sintetiza o pipeline metodológico do estudo, do tratamento dos dados à determinação de h_t^* e à avaliação fora da amostra das estratégias.

Figura 1 - Fluxograma do pipeline metodológico do estudo



Fonte: Elaboração própria.

3.1 DADOS, AMOSTRA E CONSTRUÇÃO DAS SÉRIES

A amostra utilizada na estimação dos modelos é composta por séries diárias de preços e retornos do setor sucroalcooleiro e de mercados relacionados. O período *in-sample* (IS) compreende de 18 de maio de 2010 a 31 de março de 2024, permitindo capturar diferentes regimes de mercado, incluindo fases de alta e baixa nos preços de açúcar e etanol, choques de câmbio e episódios de maior volatilidade. O período *out-of-sample* (OOS) é definido como o intervalo de 1º de abril de 2024 a 31 de março de 2025, sendo utilizado para avaliar o desempenho fora da amostra das estratégias de hedge derivadas dos modelos estimados no IS.

Para a construção de um portfólio de hedge representativo da realidade do setor, são utilizados preços spot (à vista) dos produtos sucroalcooleiros, preços dos respectivos contratos futuros de açúcar e etanol, a taxa de câmbio BRL/USD e um índice acionário que representa o investimento alternativo do produtor. Os preços de referência do mercado físico, utilizados como preços spot, são obtidos junto ao Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA). As cotações dos instrumentos de hedge (futuros) são obtidas na ICE Futures U.S., para o contrato de açúcar bruto n.º 11, e na B3 (Brasil, Bolsa, Balcão), para os contratos futuros de etanol e para o índice IBOVESPA. A série da taxa de câmbio BRL/USD é extraída do Banco Central do Brasil (BACEN).

Para capturar diferentes graus de representatividade operacional, são definidos dois portfólios-base para a análise. O primeiro, denominado A_ONLY, representa a exposição do produtor exclusivamente ao mercado físico de açúcar e utiliza como instrumento de hedge apenas o contrato futuro de açúcar (ICE n.º 11), refletindo a prática predominante do setor, uma vez que o mercado futuro de etanol apresenta baixa liquidez e, na prática, os produtores tendem a não empregar hedge de etanol de forma sistemática. O segundo, denominado AE, representa uma carteira de receita composta por açúcar e etanol no mercado físico, sendo analisado como

exercício de robustez para avaliar a sensibilidade dos resultados quando a exposição do produtor incorpora explicitamente o componente etanol e quando se admite a utilização do mercado futuro de etanol como parte do instrumento de hedge.

O recorte temporal de 18/05/2010 a 31/03/2024 foi selecionado por dois critérios principais. Em primeiro lugar, garante-se a disponibilidade e a consistência das séries históricas de preços com liquidez suficiente para a estimação econométrica. Em segundo lugar, o intervalo de mais de uma década abrange múltiplos regimes de mercado, incluindo períodos de superciclo e de depressão de commodities, diferentes fases de política monetária no Brasil e choques de volatilidade globais, como a crise de 2014–2016 e o impacto da pandemia de COVID-19, o que permite testar a robustez dos modelos de hedge dinâmico em diferentes ambientes de risco.

Todas as séries de preços são sincronizadas por data e convertidas em retornos logarítmicos contínuos, definidos por:

$$r_t = \ln \left(\frac{P_t}{P_{t-1}} \right) \quad (10)$$

em que P_t representa o preço do ativo no dia t . Essa transformação padroniza a escala dos dados, facilita a aplicação de modelos de séries temporais e é compatível com a formulação contínua dos modelos de volatilidade condicional. O tratamento dos dados inclui padronização de datas, checagem de valores inválidos e sincronização das séries. Observações com dados faltantes após o alinhamento são descartadas para evitar viés na estimação.

Após a sincronização das séries por data, padronização e conversão para retornos logarítmicos, a base final utilizada neste estudo contém $N(\text{IS})=3.618$ observações diárias (dias úteis) no período in-sample (18/05/2010 a 31/03/2024) e $N(\text{OOS})=261$ observações diárias (dias úteis) no período out-of-sample (01/04/2024 a 31/03/2025). No processo de alinhamento e tratamento de dados faltantes, o descarte de observações foi residual (1 observação, $<0,1\%$ do total no intervalo analisado), essencialmente associado ao cálculo do primeiro retorno

(devido ao deslocamento temporal inerente à transformação em variações). Quanto ao ativo alternativo, adota-se o IBOVESPA como proxy de alternativa financeira por representar uma referência líquida, amplamente observável e operacionalmente acessível para alocação de riqueza no mercado doméstico, capturando a ideia de competição entre hedge e aplicação financeira; embora o CDI represente um benchmark de baixo risco, o IBOVESPA é mais aderente ao propósito do modelo por refletir uma alternativa de investimento com risco e retorno de mercado, consistente com a motivação discutida na Seção 2.4. Por fim, as estatísticas descritivas das séries (níveis e retornos) são reportadas na Tabela 2 do Capítulo 4.

No caso do açúcar, utilizam-se cotações diárias de contratos futuros negociados na ICE, denominados em dólares norte-americanos (USD). A série utilizada como instrumento de hedge é construída por meio de uma estratégia de rolagem por vencimento (*roll-over*, RO), na qual a posição é mantida no contrato mais líquido do curto prazo e transferida para o contrato subsequente conforme se aproxima o vencimento, de acordo com um calendário operacional predefinido. Essa escolha é particularmente adequada para o setor sucroalcooleiro, pois reflete a dinâmica efetiva de manutenção e rolagem de posições em futuros, aproximando a implementação do hedge ao contexto real das usinas e preservando a interpretação econômica dos custos e ajustes associados à rolagem. Como exercício de robustez, os resultados obtidos com RO são comparados à abordagem de maturidade constante (*constant maturity*, CM), em que se combinam a primeira e a segunda telas negociadas de modo a manter, ao longo do tempo, um horizonte aproximado de um a três meses até o vencimento. A conversão de USD para BRL é realizada exclusivamente por meio da taxa de câmbio PTAX de fechamento, tratando o risco cambial como componente intrínseco do problema de hedge do produtor doméstico.

Para o etanol, utilizam-se cotações de contratos futuros em reais (BRL) negociados na B3. A construção da série de hedge também segue a abordagem RO, de forma análoga ao

procedimento adotado para o açúcar, garantindo comparabilidade entre os mercados e coerência com o horizonte de decisão das usinas. Dessa forma, as séries de preços futuros de açúcar e etanol são decompostas em retornos que refletem variações de preço em horizontes semelhantes, o que é fundamental para a estimação conjunta das relações de cobertura entre os dois mercados.

Como etapa de controle adicional, avalia-se a relação entre preços internacionais de açúcar (ICE convertidos em BRL via PTAX) e preços domésticos de açúcar cristal por meio de regressões *rolling* do tipo:

$$Spot_cristal_t = \alpha_t + \beta_t * (ICE_t * FX_t) + \varepsilon_t \quad (11)$$

onde $Spot_cristal_t$ é o preço spot do açúcar cristal doméstico no período t ; ICE_t é o preço futuro internacional do açúcar na ICE; FX_t é a taxa de câmbio (PTAX); α_t e β_t são os coeficientes dinâmicos da regressão *rolling* e ε_t é o termo de erro. A estabilidade de α_t e β_t ao longo do tempo é utilizada como critério de qualidade para a conexão entre os mercados, bem como para avaliar possíveis quebras estruturais na formação do basis entre os preços domésticos e internacionais.

A formulação tradicional da razão ótima de hedge, baseada na minimização da variância sob o pressuposto de variâncias e covariâncias constantes ao longo de toda a amostra, mostra-se limitada em ambientes marcados por heterocedasticidade, mudanças de regime e *clustering* de volatilidade, como é o caso dos mercados de commodities agrícolas e de câmbio. Em períodos de estresse, essa abordagem tende a subestimar o risco efetivo da posição descoberta e a produzir razões de hedge estáticas que podem se revelar subótimas do ponto de vista da proteção de receita e de fluxo de caixa.

3.2 MODELAGEM DO RISCO CONDICIONAL

A estimação da razão ótima de hedge dinâmica requer a modelagem de volatilidades e covariâncias condicionais entre os retornos que compõem o portfólio e o instrumento de hedge. Em vez de assumir uma matriz de covariância constante - hipótese restritiva em mercados sujeitos a heterocedasticidade, *clustering* de volatilidade e mudanças de regime - adota-se uma especificação dinâmica em dois estágios. No primeiro estágio, estimam-se as variâncias condicionais individuais por meio de modelos GARCH(1,1) univariados. No segundo estágio, estima-se a estrutura de dependência entre as séries aplicando um esquema EWMA aos resíduos padronizados, resultando em uma matriz de covariância híbrida GARCH–EWMA que permite acomodar variações temporais tanto na magnitude do risco quanto na co movimentação entre mercados.

Em um primeiro estágio, cada série de retorno $r_{i,t}$ é modelada individualmente por um processo GARCH(1,1), que permite capturar a persistência da volatilidade e o fenômeno de aglomeração de choques ao longo do tempo (BOLLERSLEV, 1986). Supondo que o retorno possa ser decomposto em uma parte sistemática e um termo de erro $\varepsilon_{i,t}$, a variância condicional $\sigma_{i,t}^2$ é atualizada segundo a seguinte expressão geral:

$$\sigma_{i,t}^2 = \omega_i + \alpha_i \varepsilon_{i,t-1}^2 + \beta_i \sigma_{i,t-1}^2 \quad (12)$$

em que $\omega_i > 0$, $\alpha_i \geq 0$ e $\beta_i \geq 0$ são parâmetros a serem estimados para cada ativo i , $\varepsilon_{i,t-1}^2$ é o resíduo do retorno no período $t-1$ e $\sigma_{i,t-1}^2$ é a variância condicional no período anterior. A condição $\alpha_i + \beta_i < 1$ garante a estacionariedade em variância do processo. Opta-se pelo GARCH(1,1) por sua parcimônia e por ser a especificação *workhorse* da literatura para capturar *clustering* e persistência de volatilidade em séries financeiras e de commodities, oferecendo bom desempenho empírico com baixo custo de parametrização (BOLLERSLEV, 1986). Neste trabalho, assume-se que as inovações padronizadas $z_{i,t} = \varepsilon_{i,t}/\sigma_{i,t}$ seguem distribuição t -

Student, permitindo acomodar caudas pesadas e curtose excessiva observadas empiricamente. A partir dessa especificação obtêm-se os desvios-padrão condicionais $\sigma_{i,t}$, que compõem a matriz diagonal D_t de volatilidades individuais.

No segundo estágio, define-se o vetor de resíduos padronizados $u_t = D_t^{-1}\varepsilon_t$, em que ε_t agrega os resíduos das séries r_t^S , r_t^F e r_t^A (quando aplicável). A dinâmica da dependência é modelada por um esquema EWMA aplicado a u_t , de forma análoga à abordagem de RiskMetrics. Inicialmente, atualiza-se uma matriz não normalizada Q_t por:

$$Q_t = (1 - \lambda)u_{t-1}u'_{t-1} + \lambda Q_{t-1} \quad (13)$$

em que $0 < \lambda < 1$ é o parâmetro de decaimento exponencial que controla o peso relativo das observações mais recentes, $u_{t-1}u'_{t-1}$ representa o produto externo dos resíduos padronizados no período $t-1$, e Q_{t-1} é a matriz não normalizada estimada no período anterior. Neste estudo, adota-se $\lambda = 0,94$ para dados diários, valor de referência consagrado na abordagem RiskMetrics, o que impõe alta persistência às correlações e evita reatividade excessiva a choques pontuais (J.P. MORGAN, 1996). Em seguida, Q_t é normalizada para obter R_t , garantindo unidade na diagonal:

$$R_t = \text{diag}(Q_t)^{-1/2} Q_t \text{diag}(Q_t)^{-1/2} \quad (14)$$

Valores de λ próximos de 1 atribuem maior persistência às correlações, enquanto valores menores tornam a matriz mais sensível a choques recentes (J.P. MORGAN, 1996).

A matriz de covariância condicional H_t resulta, por construção, da combinação da informação de volatilidade individual contida em D_t com a estrutura de correlações estimada em R_t :

$$H_t = D_t R_t D_t \quad (15)$$

Essa estrutura híbrida GARCH–EWMA permite captar simultaneamente a persistência da volatilidade em cada mercado e a evolução temporal das correlações entre os retornos,

produzindo uma matriz de covariância condicional positiva definida e adequada à estimação da razão ótima de hedge dinâmica. Além de ser compatível com a evidência empírica de clusters de volatilidade, a abordagem explora a flexibilidade dos modelos GARCH univariados e a simplicidade computacional do esquema EWMA para correlações (BOLLERSLEV, 1986; J.P. MORGAN, 1996; BAILLIE; MYERS, 1991).

Em termos formais, a razão ótima de hedge dinâmica que minimiza a variância condicional do retorno ou da riqueza do produtor pode ser escrita, em cada período t , como

$$h_t^* = \frac{cov_t(r_t^S, r_t^F)}{var_t(r_t^F)} \quad (16)$$

em que r_t^S denota o retorno do ativo no mercado físico e r_t^F o retorno do contrato futuro utilizado como instrumento de hedge. A matriz de covariância condicional H_t , estimada pela abordagem GARCH-EWMA descrita acima, fornece os elementos necessários para o cálculo dessa razão ótima a cada ponto do tempo, permitindo que o nível de hedge responda endogenamente à dinâmica da volatilidade e da correlação entre os mercados.

Antes de definir a função-objetivo do problema de otimização, procede-se a um diagnóstico das propriedades de distribuição dos retornos. São aplicados testes de Jarque–Bera (para normalidade univariada), de Mardia (para assimetria e curtose multivariadas) e testes de Ljung–Box e ARCH–LM sobre resíduos padronizados $z_{i,t}$ provenientes do ajuste GARCH, com o objetivo de verificar a presença de autocorrelação serial remanescente e de efeitos ARCH não capturados. O teste de Jarque–Bera baseia-se na estatística

$$JB = n \left[\frac{S^2}{6} + \frac{(K-3)^2}{24} \right] \quad (17)$$

em que n é o número de observações, S é a assimetria amostral e K é a curtose amostral. As medidas de Mardia são calculadas sobre o vetor multivariado de resíduos padronizados para avaliar, de forma conjunta, o afastamento em relação à normalidade multivariada (BERA; JARQUE, 1981; MARDIA, 1970).

Essas evidências reforçam a conveniência de utilizar medidas de risco assimétricas, como o *Lower Partial Moment* de segunda ordem (LPM_2), focado em perdas em relação a um alvo de retorno, em vez de depender exclusivamente da variância como medida de risco. Ao combinar o LPM_2 com os momentos condicionais do portfólio - obtidos a partir da matriz H_t estimada via GARCH-EWMA - constrói-se uma função-objetivo que penaliza mais fortemente os resultados em regiões de *downside*, alinhando o modelo à aversão ao risco dos agentes e ao foco desta tese em risco de queda de receita e de fluxo de caixa (FISHBURN, 1977; HARLOW; RAO, 1989; UNSER, 2000).

3.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE HEDGE ÓTIMO E A INCORPORAÇÃO DE FRICÇÕES OPERACIONAIS

Com a estrutura de risco condicional estabelecida, formula-se o problema de decisão de hedge como a escolha dinâmica da razão ótima h_t que maximiza um critério de utilidade média-
risco do retorno do portfólio do produtor, incorporando fricções de mercado associadas a custos de transação e rolagem. Adicionalmente, avaliam-se cenários de alocação em um ativo alternativo, de modo a refletir decisões de gestão de liquidez e de diversificação compatíveis com a realidade do setor. A formulação mantém compatibilidade com a literatura sobre razão ótima de hedge em mercados agroindustriais, ao incorporar explicitamente fricções e alternativas de alocação discutidas no referencial teórico (LENCE, 1996; CHEN; LEE; SHRESTHA, 2003).

Assume-se que o produtor é avesso ao risco e apresenta preferências representadas por uma função utilidade com aversão relativa ao risco constante (ARRC), conforme definida no Capítulo 2 (Eq. 7). Na aplicação empírica, considera-se $\gamma \in \{1, 3, 5\}$, representando perfis de aversão ao risco baixa, intermediária e elevada (PRATT, 1964; ARROW, 1965). Como os retornos são trabalhados em base logarítmica (Eq. 8), para a avaliação da utilidade adota-se a

transformação $x_t = \exp(r_t^P) - 1$, garantindo consistência entre a construção do retorno e a forma funcional da utilidade no problema de decisão.

O risco é mensurado por meio do Lower Partial Moment de segunda ordem $LPM_2(\tau)$, conforme discutido no referencial teórico. A definição geral e a forma amostral do LPM já foram apresentadas na Seção 2.3.2 (Eqs. 8–9); aqui, utiliza-se esse conceito como medida *downside* no critério de decisão, mantendo a notação. O parâmetro τ é interpretado como retorno-alvo, representando o patamar abaixo do qual resultados passam a ser tratados como economicamente desfavoráveis.

Nesta tese, τ é operacionalizado a partir da distribuição empírica, sem *look-ahead*, na janela móvel de $T = 252$ dias úteis imediatamente anterior a cada rebalanceamento, sendo calculado sobre o retorno do componente core não hedgeado (isto é, $h = 0$, de modo que o retorno-base coincide com o retorno do mercado físico r_t^S na janela). Assim, considera-se $\tau \in \{0, P50, P25, P10\}$, onde P50, P25 e P10 são os percentis 50%, 25% e 10% dessa distribuição na janela corrente, permitindo mapear diferentes níveis de conservadorismo no objetivo de proteção.

Embora $LPM_2(\tau)$ seja definido conceitualmente pelas Eqs. 8–9 do Capítulo 2, na implementação empírica ele é avaliado de forma paramétrica a partir dos momentos condicionais do portfólio, $\mu_{p,t}(h)$ e $\sigma_{p,t}(h)$, obtidos da matriz H_t . Isso viabiliza a comparação consistente do risco *downside* ao longo da busca em grade para cada candidato de h . Sob a aproximação normal condicional, uma forma fechada conveniente para o LPM_2 do retorno do portfólio é:

$$LPM_{2,t}(\tau; h) = [(\tau - \mu_{p,t}(h))^2 + \sigma_{p,t}^2(h)] \Phi\left(\frac{\tau - \mu_{p,t}(h)}{\sigma_{p,t}(h)}\right) + (\tau - \mu_{p,t}(h)) \sigma_{p,t}(h) \phi\left(\frac{\tau - \mu_{p,t}(h)}{\sigma_{p,t}(h)}\right) \quad (18)$$

em que $z_t(h) = \frac{\tau - \mu_{p,t}(h)}{\sigma_{p,t}(h)}$, $\Phi(\cdot)$ é a função de distribuição acumulada e $\phi(\cdot)$ a densidade da normal padrão. Dessa forma, o risco *downside* passa a ser função direta do nível de hedge candidato h , o que permite resolver o problema de decisão de maneira operacional e alinhada à estrutura de risco condicional estimada.

Dado esse arcabouço, o problema de decisão de hedge em cada janela consiste em escolher a razão de hedge (h_t) que maximiza um critério de desempenho média–*downside* do retorno do portfólio, sob cenários exógenos de alocação em ativo alternativo w_{alt} . O problema de otimização, baseado na função de utilidade ARRC-LPM (Nelson e Escalante, 2004), é formalmente expresso como:

$$h_t^* = \underset{0 \leq h \leq 1}{\operatorname{argmax}} \left[\mu_{p,t}(h; w_{alt}) - \frac{1}{2} \gamma LPM_{2,t}(h; \tau, w_{alt}) \right] \quad (19)$$

em que $\gamma \in \{1, 3, 5\}$ representa diferentes perfis de aversão ao risco e $LPM_2(\tau)$ é avaliado de forma paramétrica a partir de $\mu_{p,t}$ e $\sigma_{p,t}$. Impõe-se $0 \leq h \leq 1$, restringindo a estratégia a uma postura de cobertura (não especulativa). A participação no ativo alternativo satisfaz $0 \leq w_{alt} \leq 0,50$ e, na análise empírica, é fixada exogenamente em $w_{alt} \in \{0,10, 0,25, 0,50\}$. A solução é obtida por busca em grade discreta de $h \in [0,1]$, para cada combinação de γ , τ e cenário w_{alt} . A busca em grade é implementada em $h \in [0,1]$ com $N = 1001$ pontos, o que implica $\Delta h = 0,001$.

Para explicitar a forma como as fricções e o ativo alternativo afetam o retorno do produtor, considera-se a seguinte notação: r_t^S representa o retorno do ativo no mercado físico (receita da usina), r_t^F o retorno do contrato futuro utilizado como instrumento de hedge, r_t^A o retorno do ativo alternativo, h_t a razão de hedge e w_{alt} a participação do ativo alternativo na carteira. Em um cenário sem custos de corretagem e sem ativo alternativo, o retorno da carteira hedgeada pode ser escrito, de forma simplificada, como:

$$r_t^{P,0} = r_t^S - h_t r_t^F \quad (20)$$

Quando se admite a presença de ativo alternativo, mas ainda se desconsideram custos de corretagem, o retorno passa a ser dado por:

$$r_t^{P,A} = (1 - w_{alt})[r_t^S - h_t r_t^F] + w_{alt} r_t^A \quad (21)$$

Se, por outro lado, consideram-se custos de corretagem c_t , mas mantém-se $w_{alt} = 0$, tem-se:

$$r_t^{P,C} = (r_t^S - h_t r_t^F) - c_t \quad (22)$$

Finalmente, quando simultaneamente se admite a presença de ativo alternativo e de custos de corretagem, o retorno da carteira assume a forma:

$$r_t^{P,AC} = (1 - w_{alt})[r_t^S - h_t r_t^F] + w_{alt} r_t^A - c_t \quad (23)$$

Os custos c_t são modelados como fricções proporcionais associadas ao ajuste de posição e à rolagem dos contratos. Em particular, considera-se um componente de turnover no rebalanceamento, proporcional a $|h_t - h_{t-1}|$, e um componente de rolagem proporcional a $|h_t|$ quando ocorre a troca de vencimento do contrato futuro sob a regra RO. Na etapa de otimização, esses custos são incorporados ao critério de decisão por meio de uma penalização efetiva que reflete não apenas o custo de variar a posição, mas também o custo esperado associado ao carregamento/rolagem de hedges mais elevados ao longo do horizonte entre rebalanceamentos.

Essas quatro especificações de retorno são utilizadas, em conjunto com diferentes combinações de parâmetros de aversão ao risco γ e de níveis de referência *downside* τ , definindo um conjunto de modelos que inclui: (i) um modelo tradicional de mínima variância (MV), (ii) um modelo de média-variância parametrizada por γ (ARRC_MV), e (iii) modelos de *downside risk* baseados em LPM_2 com $\tau \in \{0, P50, P25, P10\}$. Dessa forma, a comparação empírica entre os modelos reflete simultaneamente a presença ou ausência de custos de

corretagem, a possibilidade de investimento em ativo alternativo e a forma escolhida para mensurar o risco.

O cenário BASE é parametrizado a partir de um custo unitário total em pontos-base (bp) por unidade de ajuste do hedge, composto por: (i) um componente fixo por operação (corretagem e emolumentos, *round-turn*) e (ii) um componente de spread/impacto de mercado associado à execução do contrato futuro. Na implementação, adota-se $k^{fixo} = 0,16\%$ (16 bp). Para o contrato futuro de açúcar, utiliza-se $k_a^{spread} = 0,02\%$ (2 bp), resultando em $k_{BASE}^A = k^{fixo} + k_a^{spread} = 0,18\%$ (18 bp). Para o portfólio AE (hedge global), o componente de spread é ponderado pelos pesos da cesta de hedge, de modo que $k_{BASE}^{AE} = k^{fixo} + w_a k_a^{spread} + w_e k_{et}^{spread}$, com $k_{et}^{spread} = 0,05\%$ (5 bp). O custo efetivo é aplicado proporcionalmente ao turnover $|h_t - h_{t-1}|$ nos rebalanceamentos e, sob a regra RO, também quando ocorre rolagem do contrato futuro.

A partir de k_{BASE} , definem-se três cenários paramétricos de fricção: LOW, com custo reduzido (50% do nível BASE), BASE, como referência, e HIGH, com custo ampliado (150% do nível BASE). Em todos os casos, os custos são debitados sempre que a razão de hedge é alterada no rebalanceamento (capturando o custo de ajuste de posição via turnover) e, adicionalmente, quando ocorre a rolagem do contrato futuro sob a regra RO (capturando o custo associado à manutenção operacional do hedge ao longo do tempo). Dessa forma, estratégias que demandem ajustes mais frequentes ou que mantenham níveis mais elevados de hedge tendem a incorrer em custos totais maiores, permitindo avaliar de forma transparente o impacto marginal das fricções sobre as razões ótimas e sobre o desempenho fora da amostra (LENCE, 1996).

O desenho empírico descrito nesta seção permite testar diretamente as hipóteses do estudo. A Hipótese 1 é avaliada ao incorporar explicitamente custos e fricções operacionais

(*turnover* e rolagem) nos cenários LOW/BASE/HIGH, verificando-se se o aumento do custo líquido reduz h_t^* e deteriora (ou não melhora) o desempenho econômico fora da amostra. A Hipótese 2 é testada por meio dos cenários exógenos de alocação em ativo alternativo w_{alt} , analisando se a competição com uma alternativa financeira líquida desloca a decisão ótima para níveis menores de hedge e altera o *trade-off* risco-retorno do produtor. A Hipótese 3 é examinada ao comparar o benchmark MV/ARRC–MV com as especificações *downside* (ARRC–LPM), verificando se a adoção de uma medida sensível a perdas altera sistematicamente h_t^* e melhora métricas orientadas à cauda e o ganho de bem-estar (ΔCE) quando o objetivo econômico é mitigar resultados adversos. Por fim, a Hipótese 4 é endereçada ao variar o parâmetro de aversão ao risco γ , avaliando se maiores níveis de aversão tornam a estratégia ótima mais protetiva e como esse efeito é condicionado por fricções e pela presença de w_{alt} . A validação econômica dessas hipóteses é realizada na etapa fora da amostra (Seção 3.4), com ênfase em CE e ΔCE como métricas primárias de comparação.

3.4 DESENHO EMPÍRICO E AVALIAÇÃO FORA DA AMOSTRA

Os procedimentos empíricos seguem uma abordagem de simulação *walk-forward* com rebalanceamento mensal. Em cada data de rebalanceamento, estima-se a estrutura de risco condicional utilizando uma janela móvel de 252 dias úteis imediatamente anterior e, a partir dela, calcula-se a razão ótima de hedge h_t para cada combinação de γ , τ , cenário de custos e cenário de alocação em ativo alternativo w_{alt} . A escolha de 252 dias úteis corresponde aproximadamente a um ano de pregões, representando um *trade-off* entre estabilidade estatística (janela mais longa) e responsividade a mudanças de regime (janela mais curta). O valor de h_t obtido é então aplicado aos retornos diários subsequentes até o próximo rebalanceamento mensal, reproduzindo o processo de decisão sequencial do produtor, que revisa periodicamente suas posições à medida que novas informações de mercado se tornam

disponíveis (BAILLIE; MYERS, 1991). A escolha do rebalanceamento mensal reflete um compromisso entre (i) o ciclo operacional típico de revisão de posições e gestão de risco e (ii) a contenção de custos de ajuste (turnover), evitando que uma frequência demasiadamente alta amplifique fricções e reduza o benefício líquido do hedge.

Embora o período IS seja utilizado como base histórica e como fonte inicial de dados para estimação, a avaliação fora da amostra é conduzida em estrutura *walk-forward*: ao longo do período OOS, os parâmetros dos modelos são reestimados em janelas móveis de 252 dias úteis imediatamente anteriores a cada data de rebalanceamento, permitindo que h_t^* responda a mudanças de regime e à dinâmica condicional de risco.

A construção da série futura segue a regra de rolagem por vencimento (RO), de modo que a posição é transferida ao contrato subsequente conforme se aproxima o vencimento. Os custos de transação incidem nos eventos de rebalanceamento mensal (turnover) e nos eventos de rolagem, de forma que estratégias que demandem ajustes mais frequentes ou carreguem hedges mais elevados incorrem em custos totais maiores. Como exercício de robustez, os resultados obtidos com RO são comparados à abordagem de maturidade constante (CM), conforme descrito na seção 3.1.

O desempenho das estratégias é avaliado com base nos retornos líquidos do portfólio (após custos). São reportadas estatísticas descritivas (média e desvio-padrão) e métricas de risco compatíveis com o foco em *downside*, incluindo $LPM_2(\tau)$ e medidas de cauda como *Expected Shortfall* (ES) em nível de confiança selecionado. Como indicadores de desempenho ajustado ao risco, utilizam-se os índices de Sharpe e Sortino. Por fim, para traduzir os resultados em termos econômicos consistentes com a aversão ao risco do produtor, calcula-se o Equivalente-Certo (*Certainty Equivalent*, CE) e compara-se o CE da estratégia hedgeada ao CE do caso não hedgeado, mensurando o ganho de bem-estar associado à estratégia (SORTINO; VAN DER

MEER, 1991; FISHBURN, 1977). Para traduzir desempenho em termos econômicos consistentes com preferências do produtor, utiliza-se o Equivalente-Certo (CE), definido como o nível de retorno certo que torna o agente indiferente entre receber esse valor com certeza e enfrentar a distribuição de retornos do portfólio. Formalmente:

$$CE = U^{-1}(\mathbb{E}[U(x)]) \quad (24)$$

em que x_t (definido conforme a transformação descrita na Seção 3.3) é o retorno do portfólio em base simples utilizado na avaliação da utilidade. A comparação entre estratégias é feita pelo ganho marginal de bem-estar em relação ao caso não hedgeado:

$$\Delta CE = CE_{\text{hedge}} - CE_{\text{não hedge}} \quad (25)$$

Valores positivos de ΔCE indicam que, para o perfil de aversão ao risco considerado, a estratégia hedgeada eleva o bem-estar econômico do produtor em relação à alternativa de permanecer exposto.

Como medida de risco de cauda, reporta-se também o Expected Shortfall (ES), que captura a perda média condicional quando o retorno está na região mais desfavorável da distribuição. Para um nível $\alpha \in \{0,05\}$, define-se:

$$ES_{\alpha} = \mathbb{E}[x \mid x \leq q_{\alpha}] \quad (26)$$

em que q_{α} é o quantil α da distribuição de x . Na prática, $ES_{5\%}$ são calculados a partir da amostra de retornos OOS de cada estratégia, permitindo comparar a severidade média de resultados extremos entre modelos.

As simulações e estimações são implementadas em Python. A estimação das volatilidades condicionais utiliza a biblioteca arch, enquanto a etapa de decisão do hedge é operacionalizada por avaliação em grade discreta de h no intervalo $[0,1]$, com seleção determinística do nível ótimo por maximização do critério de utilidade. Quando aplicável, utiliza-se uma aproximação

contínua via `soft-argmax` sobre a grade para reduzir saltos artificiais entre pontos adjacentes.

Rotinas de diagnóstico e estatísticas auxiliares são obtidas com `statsmodels` e `scipy`.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados empíricos das estratégias de hedge dinâmico ao longo do período amostral, tomando como baseline o arranjo RO + A_ONLY: o hedge é implementado operacionalmente via *roll-over* (RO) e o portfólio reflete a prática do setor, em que o produtor não utiliza derivativos de etanol (baixa liquidez), concentrando a proteção em açúcar, câmbio e na possibilidade de alocação parcial em um ativo alternativo. Como robustez, são reportados nos Anexos A e B os cenários AE (com futuro de etanol) e a abordagem CM (maturidade constante). Os resultados são apresentados separando *in-sample* (IS) - estimação e solução do problema de decisão - e *out-of-sample* (OOS) - avaliação fora da amostra - em uma simulação *walk-forward* com rebalanceamento mensal, na qual os parâmetros são atualizados a cada janela e a razão ótima estimada é aplicada ao mês subsequente.

4.1 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS E DIAGNÓSTICOS

A Tabela 2 indica que, embora as médias dos retornos sejam próximas de zero, a dispersão é economicamente relevante - com o futuro de açúcar exibindo maior volatilidade do que o spot - e, principalmente, que as distribuições se afastam fortemente do padrão gaussiano. Observa-se assimetria negativa nas três séries, mais intensa no spot de açúcar e no IBOVESPA, sinalizando maior probabilidade de movimentos extremos no lado das perdas. A curtose muito elevada (bem acima de 3) reforça a presença de caudas pesadas, característica compatível com mercados de commodities e com episódios de estresse financeiro, e diretamente relevante para risco de receita e de fluxo de caixa do produtor. A estatística de Jarque-Bera e os p-valores praticamente nulos confirmam a rejeição de normalidade para todas as séries, sugerindo que medidas baseadas apenas em variância podem ser insuficientes para caracterizar o risco em períodos adversos.

Tabela 2 - Resumo estatístico das distribuições de retornos diários

	Preço spot Açúcar	Preço futuro Açúcar	IBOVESPA
Média	0,00032	0,00040	0,00021
Desvio Padrão	0,01455	0,01928	0,01482
Assimetria	-1,12372	-0,20215	-0,80368
Curtose	19,59271	6,21880	15,47111
Jarque Bera	42,26562	1,58628	23,83540
P-valor	0,00000	0,00000	0,00000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Essa evidência descritiva amarra a motivação dos modelos adotados: a combinação de assimetria e caudas pesadas justifica permitir inovações com distribuição t-Student no estágio de volatilidade condicional e, sobretudo, complementar a leitura média–variância com medidas *downside* e de risco de cauda (como $LPM_2(\tau)$, Sortino e ES). Dessa forma, a avaliação do hedge fica mais alinhada ao objetivo econômico do produtor - mitigar perdas em cenários desfavoráveis, e não apenas reduzir a variabilidade total dos retornos.

Os diagnósticos² formais reforçam essa conclusão de modo sistemático. Os testes de normalidade univariada (JB) e multivariada (Mardia) rejeitam a hipótese gaussiana no baseline, enquanto os testes de Ljung–Box e ARCH–LM aplicados aos resíduos padronizados indicam que a dinâmica temporal e a heterocedasticidade são dimensões centrais do problema - justificando a modelagem de volatilidade/covariância condicional e o uso de especificações capazes de lidar com caudas pesadas e com o foco em *downside* na formulação e avaliação das estratégias.

Em conjunto, as estatísticas descritivas e os diagnósticos reforçam que o problema de hedge no setor envolve risco condicional, caudas pesadas e episódios de estresse. A seguir, passa-se à análise das razões ótimas de hedge estimadas (in-sample) e de como elas respondem aos componentes centrais do desenho empírico.

² Tabela disponível no Anexo C.

4.2 RAZÕES ÓTIMAS DE HEDGE: ANÁLISE *IN-SAMPLE*

Os resultados apresentados nas Tabelas 3 a 5 sintetizam como a razão ótima de hedge responde à introdução de investimento no ativo alternativo, custos de transação/rolagem e ambos simultaneamente, comparando o benchmark simétrico com critérios de *downside risk* via LPM. Um resultado transversal às três tabelas é que, à medida que a aversão ao risco aumenta, as razões ótimas de hedge aumentam. Isso fica mais evidente no comportamento do ARRC_MV, que sobe de forma monotônica de $\gamma=1$ para $\gamma=5$, refletindo a implicação econômica direta da teoria de utilidade com maior penalização de risco.

Na Tabela 3, a baixa aversão ($\gamma=1$) faz com que o produtor tolere mais risco residual e, portanto, os níveis de hedge sejam menores do que nos demais valores de γ quando há *trade-offs* relevantes. Ainda assim, no modelo padrão sem fricções, a razão ótima h_t^* permanece elevada, coerente com a forte redução de risco proporcionada pelo contrato futuro quando o hedge é barato. Ao introduzir o ativo alternativo, observa-se que quanto maior w_{alt} , menor tende a ser h_t^* , pois a diversificação reduz a exposição efetiva do portfólio ao risco do açúcar e substitui parte do papel do derivativo. Esse efeito se torna mais forte nos modelos downside, especialmente quando o alvo τ é mais conservador (por exemplo, P10). Ao incluir custos, as tabelas mostram de forma clara o mecanismo central do capítulo: fricções reduzem h_t^* de maneira monotônica (LOW→BASE→HIGH), e os modelos baseados em LPM são os mais sensíveis, frequentemente colapsando para soluções de canto ($h_t^* \approx 0$) quando o custo é alto e/ou quando w_{alt} é elevado.

Tabela 3 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 1$.

	Mínima Variância	ARRC Média Variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,9916	0,7942	0,7476	0,7466	0,7459	0,7447
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,7901	0,7463	0,7461	0,7448	0,7433
$w_{alt} = 25\%$		0,7821	0,7454	0,7449	0,6946	0,6667
$w_{alt} = 50\%$		0,7579	0,6715	0,6667	0,5785	0,5786
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,8032	0,6547	0,5975	0,4780	0,2774
$c_t = \text{BASE}$		0,8112	0,4609	0,3183	0,2350	0,1648
$c_t = \text{HIGH}$		0,7978	0,2825	0,1845	0,0620	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8015	0,6176	0,5369	0,3797	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,8062	0,3813	0,2636	0,1693	0,0766
$c_t = \text{HIGH}$		0,7801	0,2155	0,1248	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,7983	0,5209	0,4202	0,2452	0,2450
$c_t = \text{BASE}$		0,7829	0,2651	0,1836	0,0766	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,7391	0,1230	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,7688	0,2448	0,2224	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,6707	0,0557	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,6385	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 4 e a Tabela 5 confirmam e reforçam esses padrões. Primeiro, o aumento de γ desloca o nível de hedge para cima: com maior aversão, o produtor sustenta hedges mais elevados no baseline e, em particular, o ARRC_MV se aproxima do MV. Segundo, mesmo com maior aversão, o efeito econômico de fricções permanece: custos comprimem as razões ótimas e geram regiões em que o hedge deixa de ser atrativo, sobretudo nos critérios de *downside* (τ mais extremo). Terceiro, a combinação de custos + ativo alternativo amplifica o recuo do hedge,

pois w_{alt} reduz o benefício marginal da proteção via derivativos ao mesmo tempo em que o custo aumenta seu custo marginal, levando a quedas mais acentuadas de h^* - novamente, com maior intensidade nos LPMs e em τ mais conservadores. Em conjunto, as Tabelas 3-5 sustentam as hipóteses e o objetivo da tese: (i) fricções reduzem a intensidade do hedge e podem torná-lo inviável; (ii) diversificação via ativo alternativo reduz a demanda por hedge; (iii) medidas de *downside* tornam a decisão mais sensível a fricções; e (iv) maior aversão ao risco eleva h^* , embora não elimine o *trade-off* imposto por custos e pela diversificação.

Tabela 4 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 3$.

	Mínima Variância	ARRC Média Variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,9916	0,9352	0,8276	0,8211	0,7699	0,7460
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,9212	0,8091	0,8023	0,7585	0,7448
$w_{alt} = 25\%$		0,8934	0,7957	0,7898	0,7207	0,6749
$w_{alt} = 50\%$		0,8321	0,7324	0,7081	0,6117	0,5785
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,9377	0,7552	0,7184	0,5661	0,3421
$c_t = \text{BASE}$		0,9376	0,6179	0,5067	0,2939	0,1705
$c_t = \text{HIGH}$		0,9434	0,4654	0,3429	0,1185	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,9243	0,7252	0,6686	0,4696	0,2673
$c_t = \text{BASE}$		0,9244	0,5391	0,4312	0,2158	0,0844
$c_t = \text{HIGH}$		0,9333	0,3957	0,2518	0,0170	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8976	0,6380	0,5536	0,2941	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,9003	0,4202	0,2886	0,1088	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,8977	0,2429	0,0507	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8109	0,3622	0,2566	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,7979	0,1092	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,7844	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 5 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 5$.

	Mínima Variância	ARRC Média Variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,9916	0,9800	0,9069	0,8978	0,7903	0,7566
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,9715	0,8852	0,8732	0,7779	0,7455
$w_{alt} = 25\%$		0,9542	0,8432	0,8319	0,7443	0,6868
$w_{alt} = 50\%$		0,9024	0,7810	0,7612	0,6248	0,5785
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,9801	0,8275	0,7848	0,6295	0,3743
$c_t = \text{BASE}$		0,9789	0,7145	0,6441	0,3598	0,1867
$c_t = \text{HIGH}$		0,9793	0,5935	0,4626	0,1818	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,9715	0,7834	0,7423	0,5300	0,2955
$c_t = \text{BASE}$		0,9701	0,6610	0,5546	0,2649	0,0998
$c_t = \text{HIGH}$		0,9726	0,4957	0,3831	0,0587	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,9542	0,7256	0,6624	0,3402	0,2752
$c_t = \text{BASE}$		0,9549	0,5081	0,4024	0,1351	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,9574	0,3661	0,1743	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8950	0,4483	0,3281	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,8904	0,1887	0,0223	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,8843	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

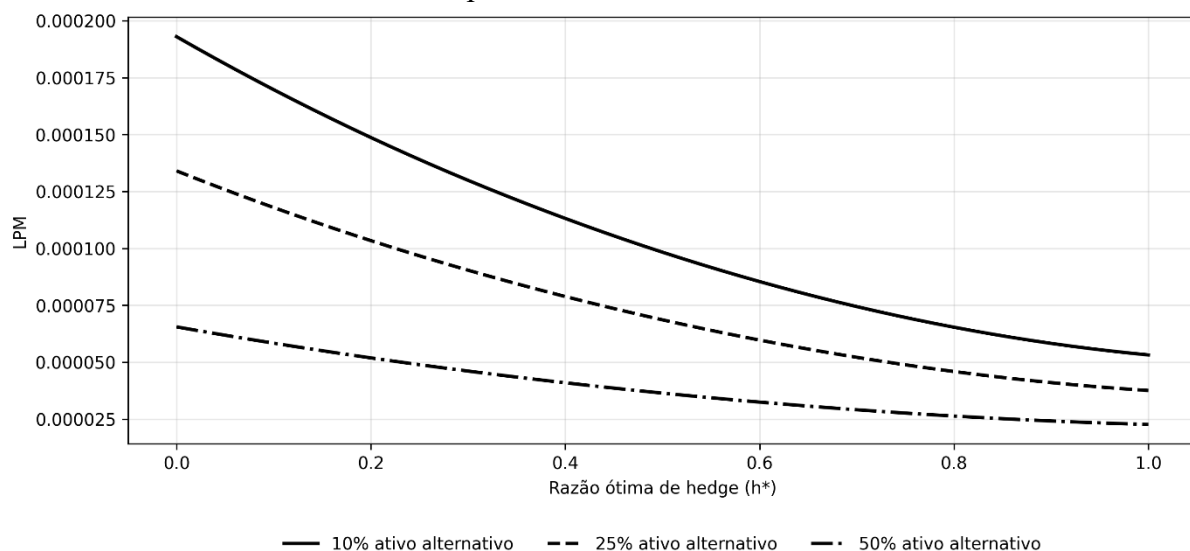
Fonte: Resultados da pesquisa.

Em síntese, as Tabelas 3-5 mostram que h^* responde de forma sistemática a custos, w_{alt} e γ , com diferenças entre especificações ligadas ao modo como o risco de perda é penalizado. Para visualizar esse mecanismo e identificar onde as mudanças de regime ocorrem no grid de cenários, passa-se à análise de sensibilidade nas Figuras 2-12.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE: CUSTOS, ATIVO ALTERNATIVO E AVERSÃO AO RISCO

A Figura 2 explicita esse *trade-off*: para cada combinação de γ , custos e w_{alt} , h^* é determinado pelo ponto em que o critério de downside (LPM) - ou o *trade-off* média-downside - se torna relativamente mais atrativo.

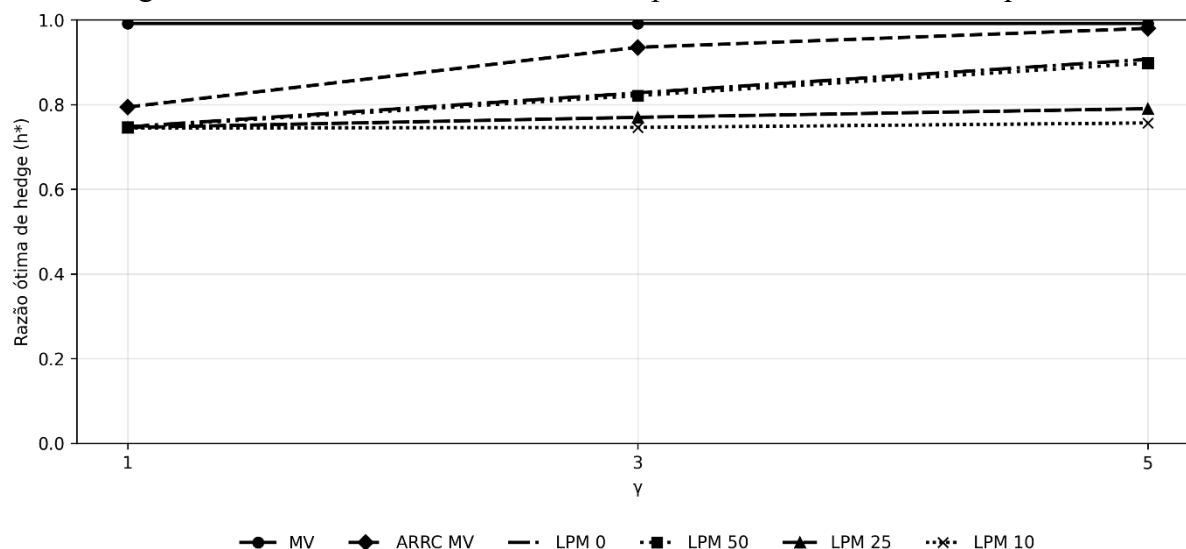
Figura 2 - Momentos parciais inferiores (LPM) calculados para o modelo ARRC média variância, sem custos de transação, para diversos níveis de investimento no ativo alternativo e perfil de risco médio.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Em particular, LPM0 e LPM50 tendem a ficar muito próximos porque, em várias janelas, a mediana (P50) dos retornos está próxima de zero, de modo que $\tau = 0$ e $\tau = P50$ geram praticamente o mesmo conjunto de perdas e curvas quase indistintas. Já casos em que LPM10 aparece ligeiramente acima de LPM25 em h^* podem ocorrer porque o ótimo depende da forma/curvatura de $LPM(h)$ sob caudas pesadas e choques extremos em cada janela (além da busca em grade), produzindo pequenas inversões locais sem alterar a leitura econômica central do capítulo.

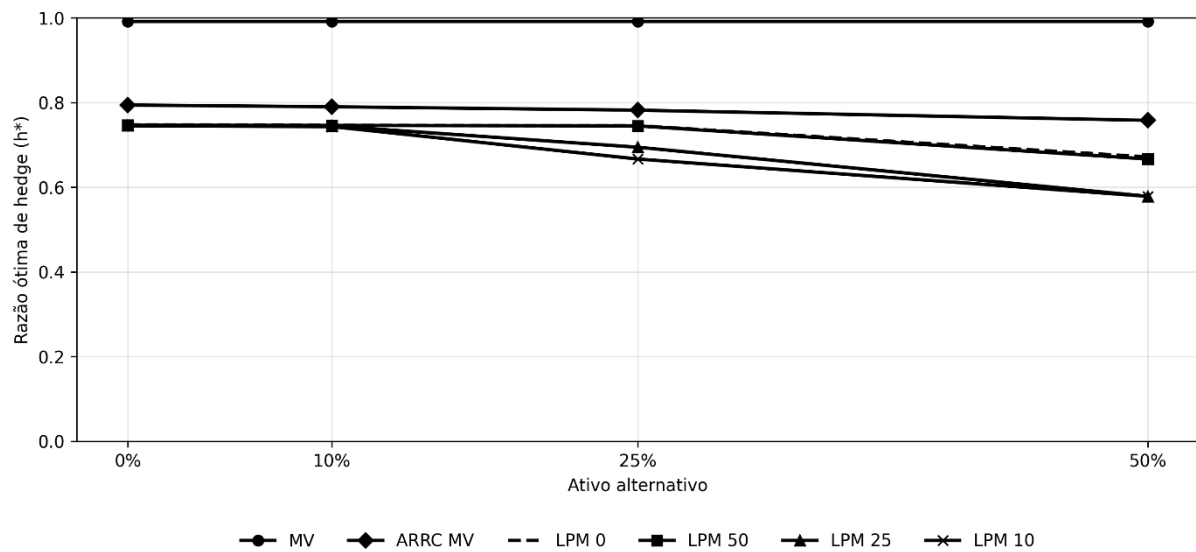
Figura 3 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo um: modelo padrão.



Fonte: Resultados da pesquisa.

A Figura 3 resume o modelo padrão - sem custos e sem investimento no ativo alternativo - e reforça o que já havia sido sugerido pelas Tabelas 3-5: o MV permanece praticamente colado em $h^* \approx 1$, enquanto o aumento da aversão ao risco (γ) eleva as razões ótimas nos modelos com preferência (especialmente no ARRC_MV e no LPM com alvos mais altos, isto é, $\tau = 0$ e $\tau = P50$). Também fica nítido que LPM0 e LPM50 praticamente se sobrepõem, coerente com a interpretação anterior de que, em muitas janelas, a mediana dos retornos está próxima de zero, tornando a mudança de alvo quase irrelevante para a região de *downside* efetivamente penalizada.

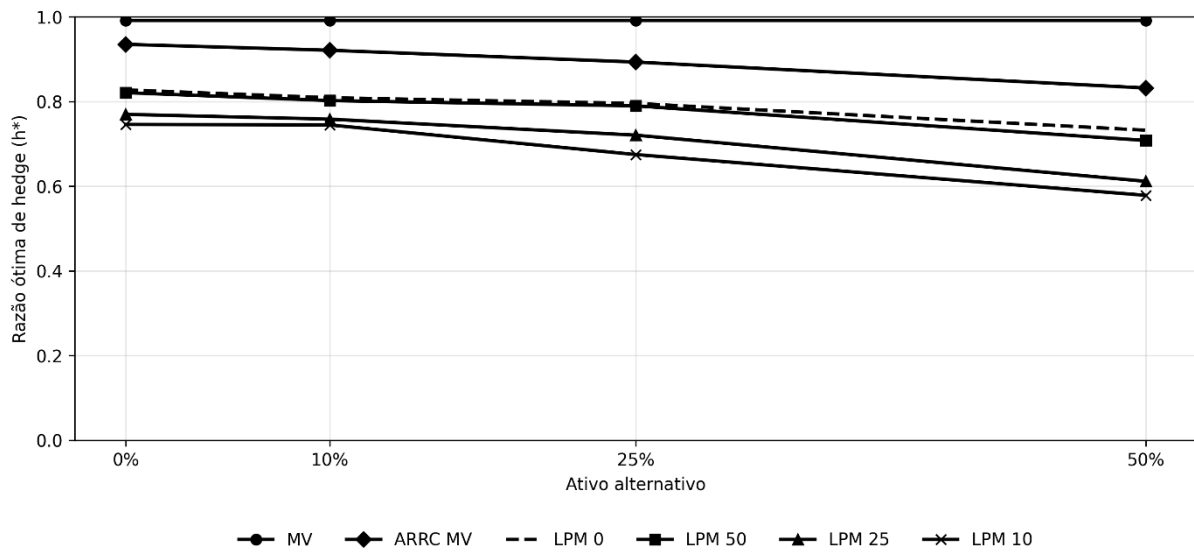
Figura 4 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo dois: modelo padrão mais investimento, $\gamma = 1$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam o modelo com ativo alternativo para os diferentes níveis de γ . O padrão é monotônico e intuitivo: quanto maior w_{alt} , menor tende a ser h^* , pois a diversificação desloca parte do risco para fora do bloco spot-futuros e reduz o benefício marginal de ampliar a cobertura. Esse efeito é mais pronunciado nos modelos de downside com alvos mais baixos (LPM25 e LPM10), que são justamente os que mais “cedem” quando o portfólio já está parcialmente protegido via diversificação; ainda assim, ao comparar as três figuras, observa-se que γ continua relevante (as curvas se deslocam para cima de $\gamma = 1$ para $\gamma = 5$), indicando que a maior aversão ao risco sustenta níveis de hedge mais elevados mesmo com a presença do ativo alternativo.

Figura 5 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo dois: modelo padrão mais investimento, $\gamma = 3$.



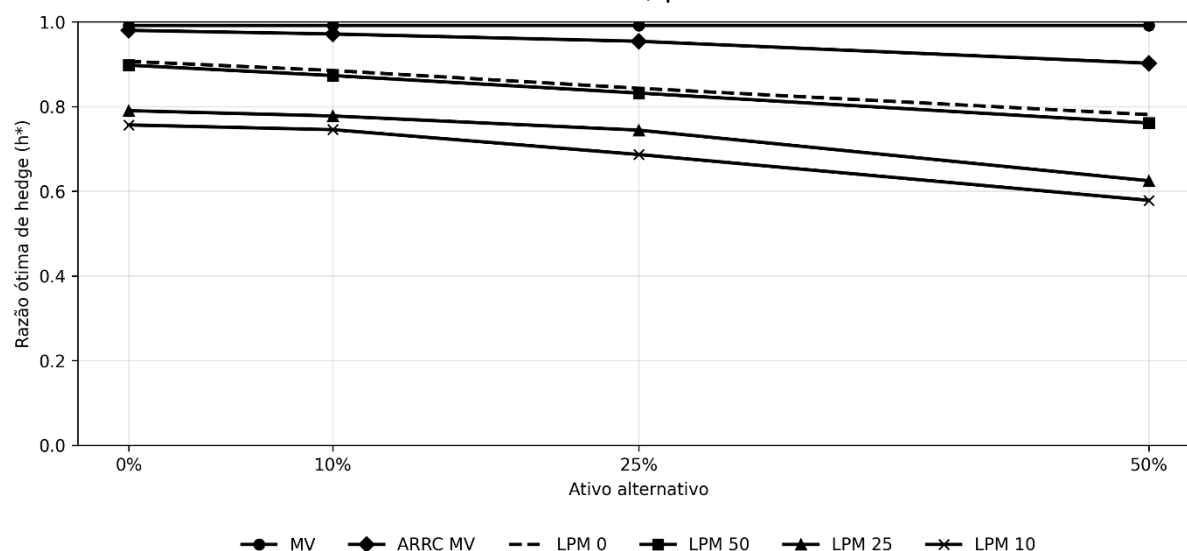
Fonte: Resultados da pesquisa.

Em termos de comparação, o comportamento geral é consistente com Cruz Júnior (2009), mas não totalmente alinhados a Mattos, Garcia e Nelson (2008), ao mostrar que a possibilidade de investir em um ativo alternativo reduz a razão ótima de hedge. A diferença é que, no seu caso, a redução não elimina a sensibilidade à aversão ao risco: ao contrário do resultado reportado por Cruz Júnior de baixa sensibilidade de h^* a γ quando apenas a hipótese do ativo alternativo é relaxada, aqui a elevação de γ ainda aumenta h^* . Uma explicação natural é que o ativo alternativo utilizado não domina o portfólio em termos de alto retorno com baixo risco, sua volatilidade limita o quanto a diversificação substitui o hedge, mantendo a proteção via derivativos economicamente relevante ao longo dos cenários.

Vale notar que o modelo MV opera como um benchmark mecânico de minimização da variância condicional, definindo h_t^* essencialmente pela razão $\text{cov}_t(r^S, r^F) / \text{var}_t(r^F)$. Como a função-objetivo do MV não incorpora explicitamente utilidade, referência downside ou penalização por custos de transação, sua sensibilidade a w_{alt} e aos cenários de custo é limitada;

por isso, a série de h^* tende a permanecer próxima do hedge cheio, mesmo quando as demais especificações reduzem a posição por considerarem fricções e/ou *downside*.

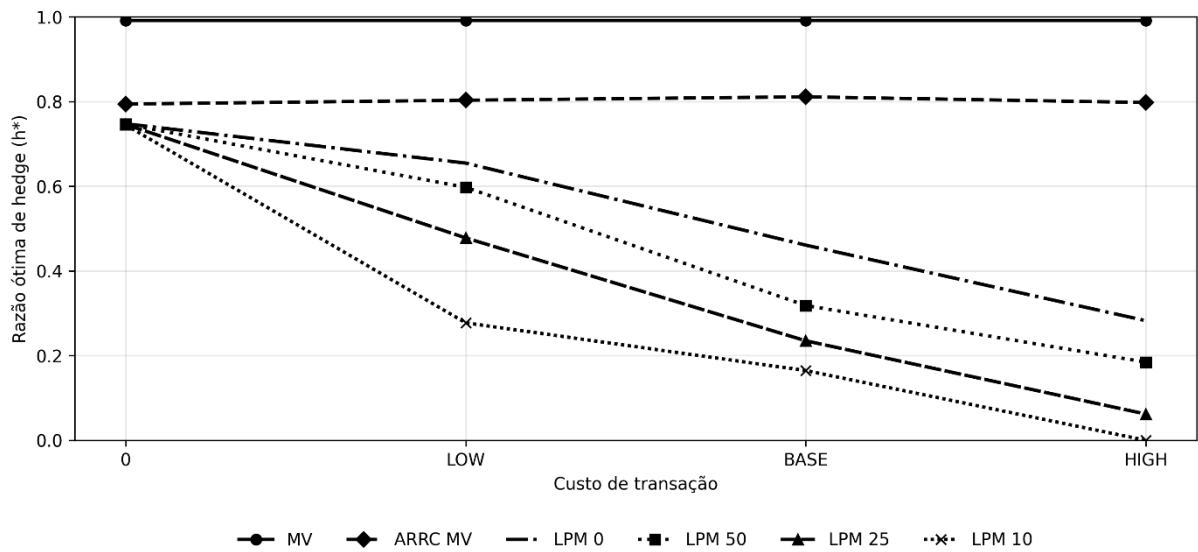
Figura 6 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo dois: modelo padrão mais investimento, $\gamma = 5$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

As Figuras 7, 8 e 9 sintetizam os resultados do Modelo (3) - isto é, o modelo padrão com custos de transação, sem investimento no ativo alternativo - para $\gamma = 1$, $\gamma = 3$ e $\gamma = 5$, respectivamente. Em linha com a leitura das Tabelas 3–5, elas isolam o efeito das fricções: ao passar de 0 $\rightarrow$ LOW $\rightarrow$ BASE $\rightarrow$ HIGH, as razões ótimas caem de forma monotônica, evidenciando que o custo transforma o hedge em uma decisão de custo-benefício e não apenas em redução “gratuita” de risco.

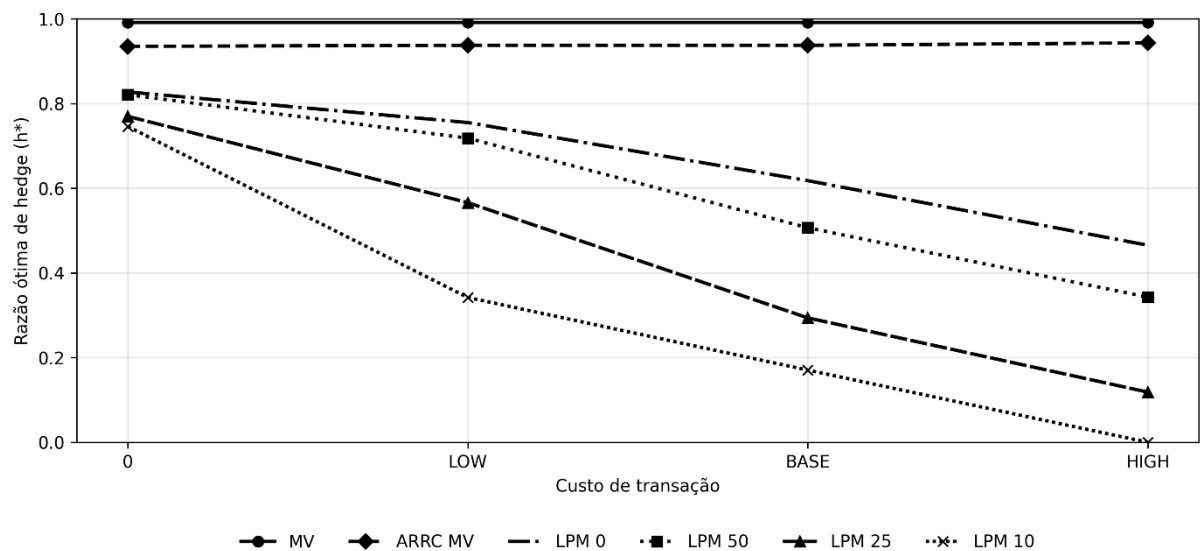
Figura 7 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo três: modelo padrão mais custos de transação como proporção do valor inicial contrato, com $\gamma = 1$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

O padrão mais forte aparece nos modelos baseados em *downside*. Os LPMs reduzem h^* rapidamente conforme os custos aumentam, e a convergência é tanto mais rápida quanto mais conservador é o alvo τ : LPM10 é o primeiro a “morrer”, atingindo $h^* \approx 0$ no cenário HIGH (nas três figuras), enquanto LPM25 cai logo depois e LPM0/LPM50 preservam hedges positivos por mais tempo. Em contraste, MV permanece praticamente em $h^* \approx 1$ ao longo dos cenários porque, por construção, ele reage essencialmente à variância/covariância (e não ao componente de custo que opera como penalização de retorno), ao passo que ARRC_MV é bem mais estável do que os LPMs, mas ainda incorpora o *trade-off* via utilidade.

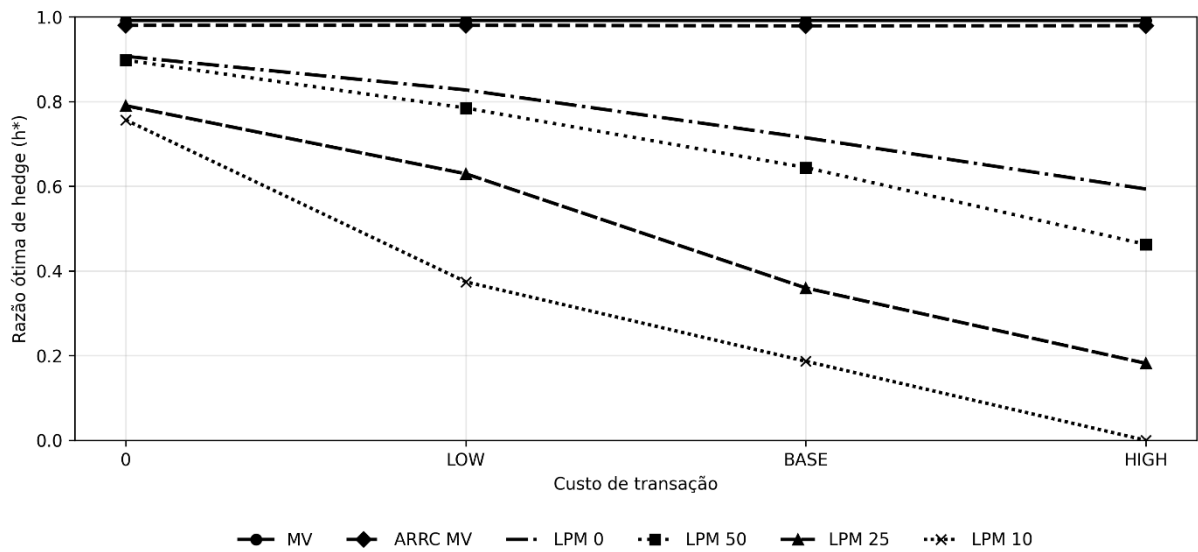
Figura 8 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo três: modelo padrão mais custos de transação como proporção do valor inicial contrato, com $\gamma = 3$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Comparando as três figuras, nota-se também que aumentar γ desloca as curvas para cima e reduz a sensibilidade aos custos: produtores mais avessos ao risco sustentam níveis de hedge maiores em todos os cenários, e a queda com o aumento do custo é menos acentuada - exatamente o mecanismo discutido por Cruz Júnior (2009). A principal diferença em relação ao exemplo do autor é que, aqui, o cenário de custo alto não necessariamente zera todos os modelos: o “apagamento” é concentrado nos critérios mais conservadores de *downside* (especialmente LPM10), enquanto MV/ARRC_MV e, em muitos casos, LPM0/LPM50 ainda mantêm hedge positivo, mas em níveis inferiores aos primeiros modelos.

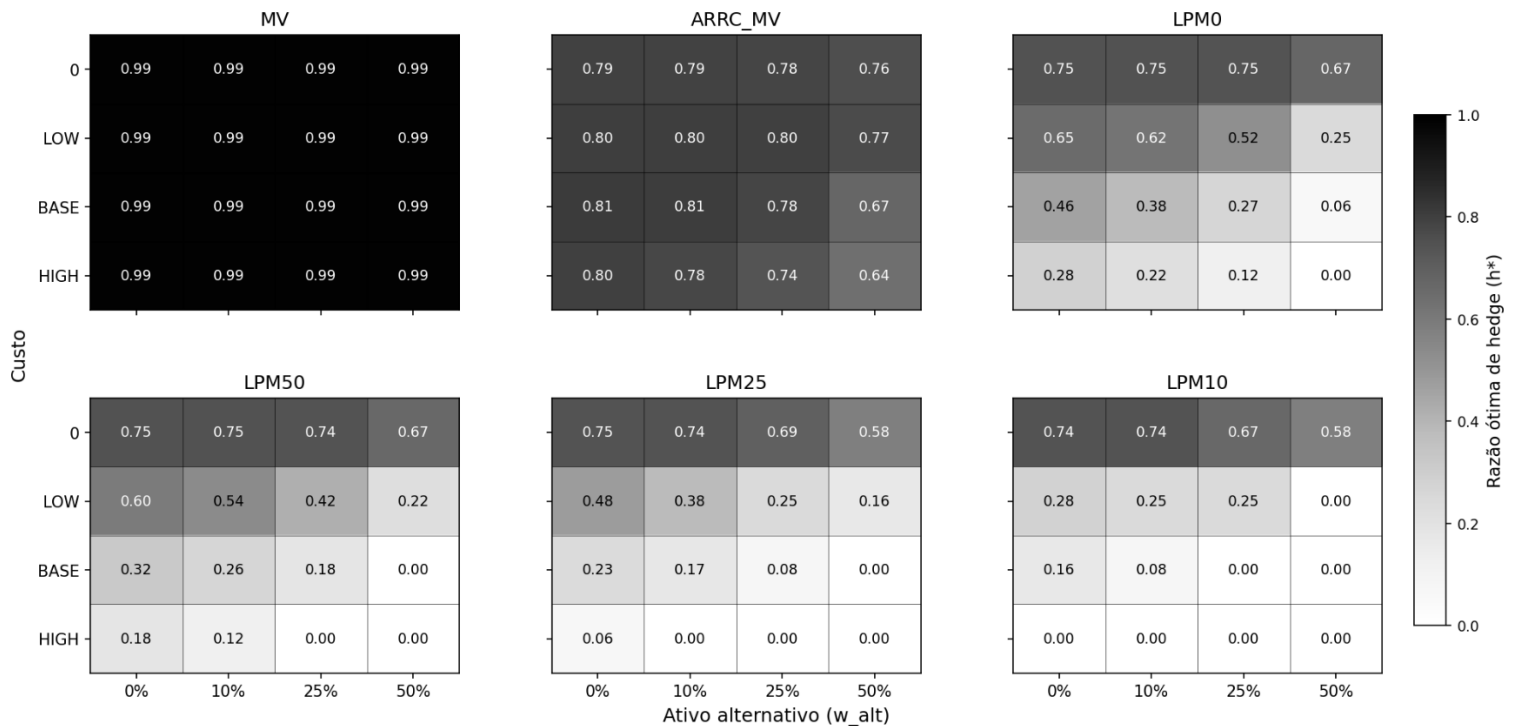
Figura 9 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo três: modelo padrão mais custos de transação como proporção do valor inicial contrato, com $\gamma = 5$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

As Figuras 10, 11 e 12 sintetizam o Modelo (4), isto é, a decisão de hedge quando duas fricções atuam simultaneamente: (i) custos de transação e (ii) alocação no ativo alternativo (w_{alt}). A leitura do *heatmap* é direta: andar para a direita (maior w_{alt}) e para baixo (maior custo) reduz sistematicamente h^* . Em outras palavras, o ativo alternativo substitui parte do papel do hedge e os custos reduzem o ganho líquido de aumentar a posição; quando os dois efeitos se combinam, a queda do hedge é potencializada, exatamente como sugerido pela teoria do *trade-off* risco-retorno com fricções.

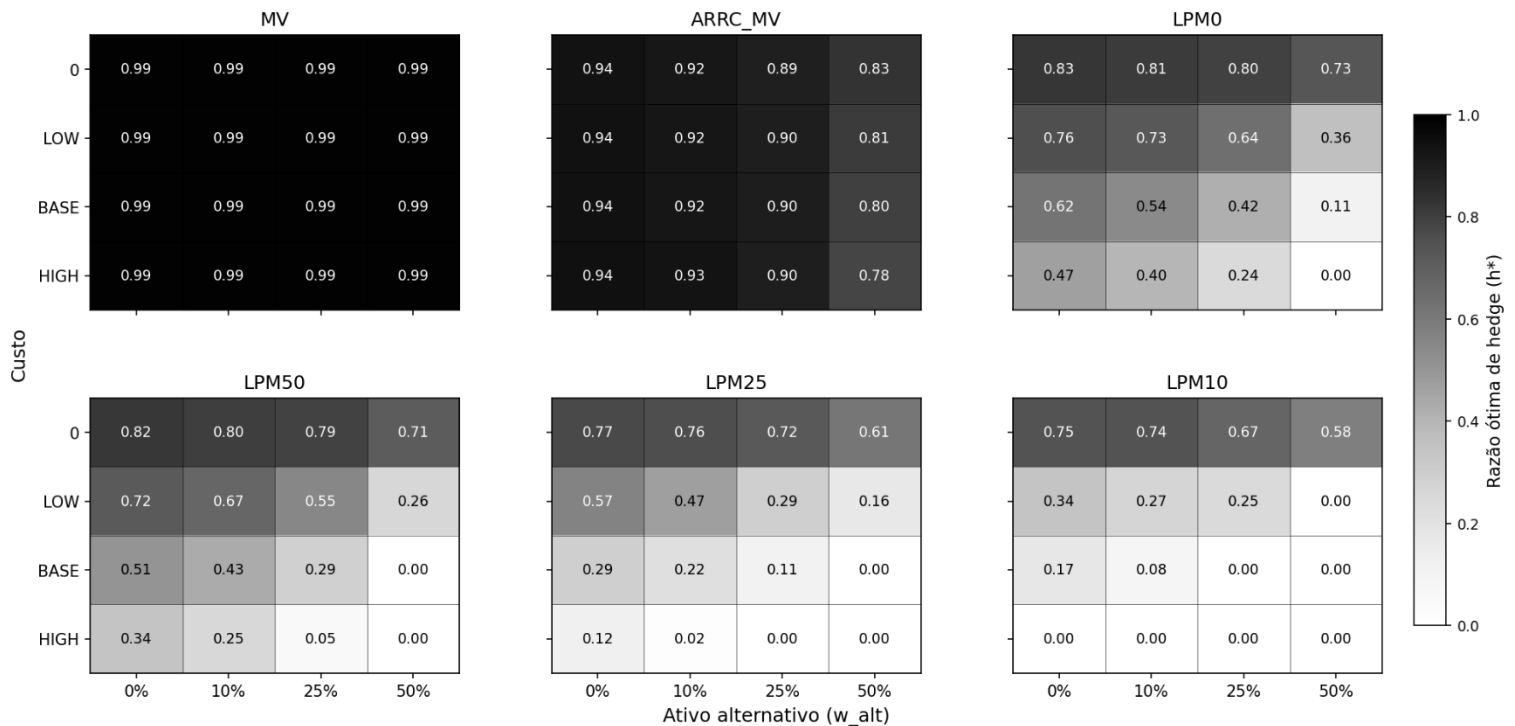
Figura 10 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo quatro: modelo padrão com investimento no ativo alternativo, mais custos de transação, com $\gamma = 1$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

No detalhamento por modelos, o padrão é consistente com as Figuras 7–9 (custos) e com as Figuras 3–6 (ativo alternativo): MV permanece praticamente colado em $h^* \approx 1$ em todo o grid, enquanto ARRC_MV sustenta níveis relativamente altos, mas já mostra redução quando w_{alt} e custo aumentam. Já os modelos baseados em LPM são os mais sensíveis: LPM10 e LPM25 “desligam” o hedge muito cedo - aparecem vários blocos com $h^* = 0$ quando se combina BASE/HIGH com $w_{alt} \geq 25\%$ (e, no extremo $w_{alt} = 50\%$, o hedge tende a desaparecer mesmo com custos moderados). LPM0 e LPM50 mantêm-se mais próximos entre si (inclusive na linha “0” de custo), reforçando a explicação anterior: quando o alvo τ está próximo de zero/mediana em muitas janelas, mudar de $\tau = 0$ para $\tau = P50$ altera pouco a região efetivamente penalizada.

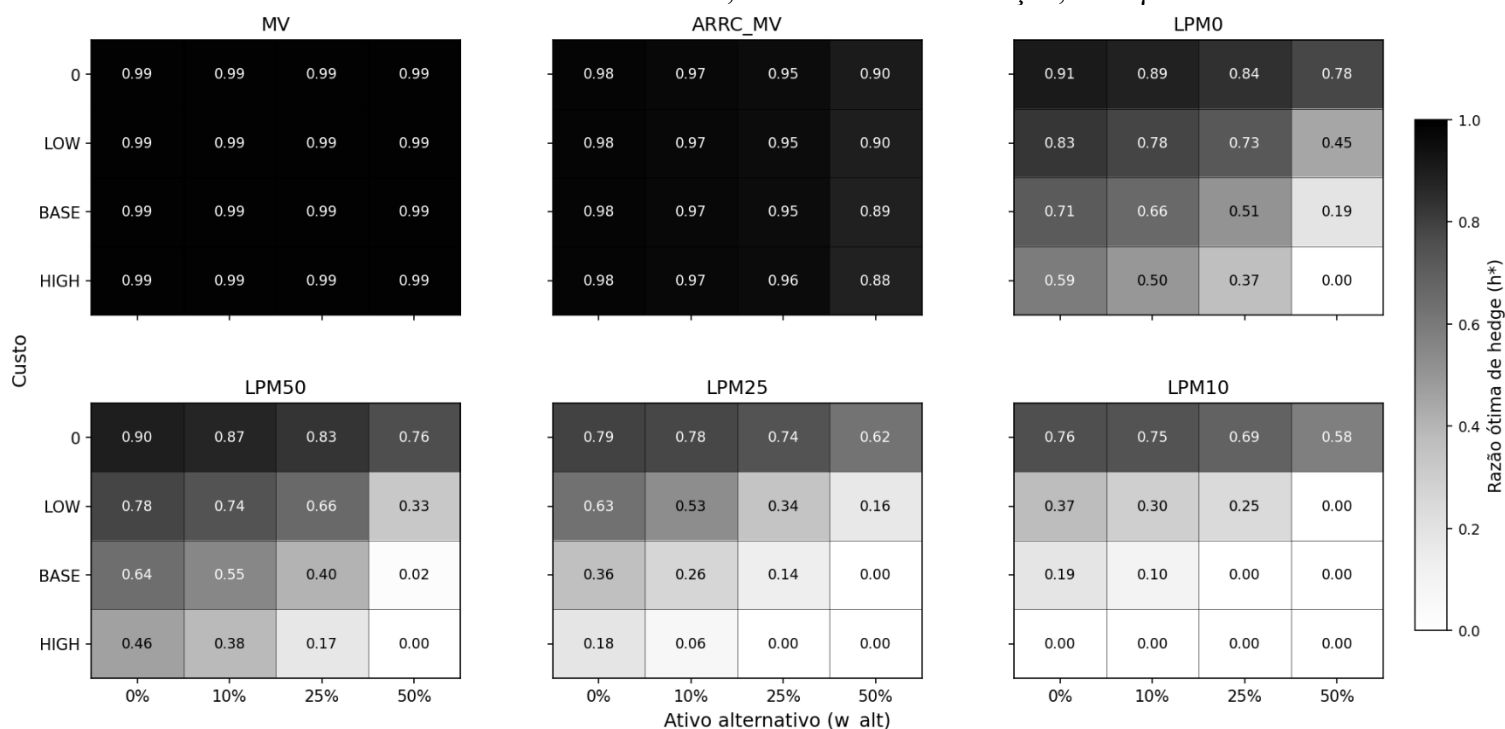
Figura 11 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo quatro: modelo padrão com investimento no ativo alternativo, mais custos de transação, com $\gamma = 3$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Comparando $\gamma = 1$, $\gamma = 3$ e $\gamma = 5$, fica claro que maior aversão ao risco desloca o mapa para cima: para o mesmo par (w_{alt} , $custo$), os valores de h^* tendem a ser maiores quando γ aumenta, e algumas combinações que já zeravam o hedge em $\gamma = 1$ passam a sustentar hedge residual em $\gamma = 3$ e sobretudo em $\gamma = 5$ (especialmente em ARRC_MV e nos LPMs menos conservadores). Esse resultado está alinhado ao argumento de Cruz Júnior (2009) de que a interação ativo alternativo + custos torna o hedge menos atrativo e leva h^* rapidamente a zero em vários cenários - com a ressalva de que, aqui, a persistência de hedge em alguns blocos (principalmente para γ alto e custos baixos) indica que a decisão continua economicamente relevante quando o produtor é mais avesso ao risco e as fricções não estão no extremo.

Figura 12 - Resumo dos resultados obtidos para o modelo quatro: modelo padrão com investimento no ativo alternativo, mais custos de transação, com $\gamma = 5$.



Fonte: Resultados da pesquisa.

Em alguns recortes, observa-se uma aparente anomalia em que o resultado associado ao LPM_2 com alvo mais conservador (por exemplo, P10) aparece ligeiramente acima do obtido com um alvo menos conservador (por exemplo, P25), contrariando uma monotonicidade estrita esperada por intuição. Esse comportamento pode ocorrer por razões numéricas e empíricas que não invalidam o mecanismo econômico do modelo. Primeiro, a razão ótima h_t^* é obtida por busca em grade discreta; quando duas soluções adjacentes na grade entregam valores muito próximos do critério, pequenas variações nos momentos condicionais estimados (e, em particular, em episódios de caudas pesadas e mudanças rápidas de volatilidade) podem levar a uma troca local no ponto escolhido como máximo. Segundo, como a avaliação do risco downside é sensível à região inferior da distribuição, mudanças de regime podem alterar a forma como P10 e P25 ativam penalizações em janelas específicas, gerando inversões pontuais sem que isso implique reversão do padrão geral. Em termos de interpretação econômica, essas

não monotonicidades são marginais e não alteram as conclusões centrais: em média, targets mais conservadores tendem a tornar a decisão de hedge mais prudente e, em cenários severos, podem aproximar h^* de zero. Como refinamentos metodológicos, seria possível reduzir ainda mais essas inversões locais com (i) grade mais fina (menor Δh) e (ii) procedimentos de otimização contínua (por exemplo, maximização numérica direta do critério), mantendo o arcabouço conceitual; contudo, os resultados apresentados já são robustos no sentido qualitativo e econômico, como evidenciado pelas métricas OOS e pelos ganhos de bem-estar reportados na sequência.

A análise de sensibilidade mostra como a decisão ótima h^* se ajusta endogenamente ao *trade-off* entre proteção e fricções, bem como ao papel do ativo alternativo na diversificação. No entanto, como o objetivo da tese não é apenas descrever h^* , mas avaliar o efeito econômico das estratégias fora da amostra, passa-se à comparação das especificações com base em métricas de bem-estar e risco de cauda no período OOS.

Até aqui, os resultados foram apresentados principalmente em termos de razões ótimas estimadas (h_t^*), isto é, a solução do problema de decisão em cada rebalanceamento com base na janela móvel anterior (dimensão *in-sample*, no sentido de estimação/otimização). A avaliação econômica das estratégias, contudo, é conduzida fora da amostra: o h_t^* escolhido em cada data é aplicado ao período subsequente na simulação *walk-forward*, e é sobre esses retornos realizados (líquidos de fricções, quando aplicável) que se calculam as métricas de desempenho e bem-estar. Assim, a seguir, a comparação entre modelos passa a ser feita prioritariamente em termos de métricas OOS, com ênfase em ΔCE e em medidas de cauda.

4.4 AVALIAÇÃO DO BEM-ESTAR: ANÁLISE *OUT-OF-SAMPLE*

Em continuidade às evidências das Seções 4.2 e 4.3, esta seção avalia se as razões ótimas estimadas se traduzem em ganho econômico efetivo quando aplicadas fora da amostra (OOS)

na simulação *walk-forward*. A comparação é conduzida via Equivalente-Certo (CE) e seu ganho marginal (ΔCE), definidos no Capítulo 3 (Seção 3.4). Por construção, $\Delta CE > 0$ indica que a estratégia melhora o bem-estar em relação ao caso não hedgeado, mantidas as hipóteses de custos e alocação no ativo alternativo.

Os resultados completos para cada combinação de custos, participação no ativo alternativo e especificação de hedge estão no Anexo D (Tabelas 19–27). No corpo do texto, destacam-se cenários representativos para explicitar os mecanismos e facilitar a leitura dos padrões.

Tabela 6 - Síntese do ganho de bem-estar (ΔCE) no período OOS para cenário BASE e $w_{alt} = 10\%$ (Anexo D, Tabela 20)

Modelo (cenário BASE, $w_{alt} = 10\%$)	$\gamma = 1$	$\gamma = 3$	$\gamma = 5$
ARRC–MV	0,0006	-0,0214	-0,0240
ARRC–LPM (P25)	0,0613	0,0351	0,02083
ARRC–LPM (P10)	0,0269	0,0287	0,03551

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: $\Delta CE = CE_{\text{hedge}} - CE_{\text{não hedge}}$, calculado sobre retornos líquidos fora da amostra (simulação *walk-forward* com rebalanceamento mensal). Valores positivos indicam ganho de bem-estar em relação ao caso não hedgeado no mesmo cenário. O detalhamento completo por custos, w_{alt} e targets consta no Anexo D (Tabelas 19-27).

A Tabela 6 resume o ΔCE no cenário BASE (com a participação no ativo alternativo fixada no valor indicado na tabela). Nesse recorte, as especificações ARRC–LPM apresentam ganhos de bem-estar positivos de forma consistente, enquanto o ARRC–MV se mostra próximo de neutro em baixa aversão ao risco e pode se tornar negativo quando a aversão ao risco aumenta.

Um padrão que aparece de forma recorrente é que, quanto maior a aversão ao risco (γ), maior tende a ser a relevância econômica do hedge quando ele é ótimo (o critério penaliza mais a exposição a perdas). Nesse ambiente, a comparação entre modelos favorece especificações que tratam explicitamente o *downside*, pois o ganho de bem-estar passa a depender menos de variância média e mais da contenção de perdas em cenários adversos.

Entre os *targets downside*, a dominância pode mudar conforme γ : em níveis mais baixos/intermediários, um alvo menos restritivo pode entregar melhor equilíbrio proteção-custo; sob maior conservadorismo (γ mais alto), um alvo mais exigente tende a se alinhar melhor ao objetivo econômico do produtor. Esse resultado é coerente com o mecanismo discutido na tese: ao internalizar o *trade-off* proteção $\times$ fricções, a estratégia ajusta endogenamente o nível de hedge - podendo reduzir a posição (e, em limites, aproximá-la de zero) quando o custo marginal de manter/ajustar supera o benefício marginal de reduzir *downside*.

Como métricas complementares (sem competir com o CE), indicadores como Sortino, turnover (τ) e ES(5%) ajudam a qualificar como os ganhos de bem-estar são obtidos: se por melhora do desempenho ajustado ao *downside*, por redução da severidade de perdas na cauda e/ou por maior estabilidade operacional (menor necessidade de ajustes).

Em geral, quando especificações *downside* exibem ΔCE superior, espera-se observar também sinais de melhora no controle de risco de cauda (por exemplo, perdas menos severas em percentis extremos) - ainda que médias líquidas sejam pequenas e métricas tradicionais (como Sharpe) não sejam o principal canal econômico. Ao mesmo tempo, o turnover ajuda a distinguir ganhos teóricos de estratégias potencialmente mais custosas de implementar.

Para sintetizar esses mecanismos em um recorte representativo, a Tabela 7 reúne, lado a lado, métricas de desempenho e de cauda no OOS.

Tabela 7 - OOS (Cenário: BASE, $w_{alt} = 10\%$, $\gamma = 3$)

Estratégia	Média	Desvio-padrão	Sharpe	Sortino	ES(5%)
MV	-0,00018	0,00805	-0,02279	-0,02135	-0,02002
ARRC_MV	-0,00039	0,01039	-0,03469	-0,03264	-0,02511
ARRC_LPM_P25	-0,00023	0,01428	-0,00834	-0,00814	-0,02968
ARRC_LPM_P10	-0,00027	0,01487	-0,00896	-0,00895	-0,03025

Fonte: Resultados da pesquisa.

Em OOS, observa-se um *trade-off* nítido entre contenção de volatilidade e melhora de métricas ajustadas ao risco. O benchmark MV apresenta a menor dispersão e um ES(5%) menos severo do que as especificações *downside*, enquanto os modelos ARRC-LPM (P25 e P10) exibem maior desvio-padrão e cauda mais pesada (ES mais negativo), porém entregam Sharpe/Sortino substancialmente menos negativos - isto é, melhor relação retorno/risco segundo métricas centradas em desempenho ajustado ao risco. No mesmo cenário, a leitura em bem-estar (ΔCE) também favorece as especificações *downside* para $\gamma = 3$, ARRC_LPM_P25 e ARRC_LPM_P10 apresentam ΔCE positivo, enquanto MV e ARRC_MV permanecem com ΔCE negativo, sugerindo que o padrão qualitativo de dominância econômica dos critérios *downside* (quando o hedge não colapsa por fricções) se mantém fora da amostra.

Além do ganho econômico, importa avaliar a viabilidade operacional das estratégias ao longo do OOS. Por isso, reportam-se a dispersão da razão ótima e o turnover médio (τ), que capturam, respectivamente, a estabilidade do nível de cobertura e a intensidade de ajustes - canal diretamente associado às fricções.

Na próxima seção, esses resultados são submetidos a verificações de robustez sob variações de portfólio e de construção das séries, para checar se os padrões permanecem qualitativamente estáveis.

4.5 VERIFICAÇÃO DE ROBUSTEZ

Como verificação de robustez, os principais resultados foram reavaliados sob variações de portfólio e de construção das séries, mantendo-se a lógica de comparação entre benchmarks (MV/ARRC_MV) e especificações *downside* (ARRC-LPM), bem como o critério econômico (CE e ΔCE). Em particular, análises complementares consideram (i) cenários de portfólio alternativos com inclusão do futuro de etanol (AE), (ii) uma abordagem de maturidade constante (CM) para tratar a rolagem de forma alternativa e reduzir efeitos mecânicos de

escolha de vencimentos, e (iii) diagnósticos e métricas adicionais reportados nos anexos. De modo geral, as conclusões centrais permanecem qualitativamente estáveis: fricções e custos operacionais seguem como principais determinantes da compressão de h^* ; a presença de ativo alternativo amplifica o efeito ao reduzir o benefício marginal da cobertura; e especificações downside tornam a decisão mais conservadora - especialmente sob targets mais exigentes - podendo levar a soluções próximas de zero quando o *trade-off* “proteção $\times$ custo” se deteriora. Essas evidências reforçam que o resultado não depende de um único desenho operacional, mas reflete um mecanismo econômico robusto.

No exercício de robustez via portfólio AE (com inclusão do futuro de etanol), observa-se que as magnitudes das razões ótimas podem se alterar, mas o padrão direcional permanece: (i) a presença de fricções segue reduzindo a posição ótima; (ii) a possibilidade de alocação em ativo alternativo segue comprimindo a necessidade de hedge; e (iii) critérios *downside* permanecem mais conservadores, sobretudo quando o alvo de proteção é mais exigente. Em termos econômicos, isso indica que o mecanismo identificado no corpo do capítulo não depende de uma composição específica do portfólio, mas de uma relação persistente entre benefício marginal da cobertura e custo operacional/risco residual.

De modo complementar, a adoção da abordagem de maturidade constante (CM) - ao tratar a rolagem de forma alternativa e reduzir efeitos mecânicos de seleção de vencimentos - também preserva as conclusões centrais. Em particular, os resultados sob CM reforçam que a compressão de hedge observada quando se incorporam fricções não é um artefato da construção das séries: quando custos operacionais se intensificam e a estratégia passa a internalizar esse atrito, a solução ótima pode se aproximar de valores muito baixos (ou mesmo próximos de zero) para especificações *downside* mais restritivas, consistentes com o *trade-off* “proteção $\times$ custo” descrito ao longo do capítulo.

Além da robustez operacional, o Anexo D (Tabelas 19-27) permite qualificar a robustez econômica das conclusões via CE e ΔCE . Em termos de ganho de bem-estar, as especificações ARRC-LPM com alvo mais exigente (τ no 10º percentil) tendem a apresentar o maior ΔCE na maioria das combinações de cenário e parâmetros, sinalizando que a proteção contra cauda é o canal dominante quando a comparação é feita em utilidade (e não apenas em volatilidade). Importante notar que há exceções informativas: em cenários mais desfavoráveis (p.ex., combinações em que o hedge é caro e o benefício marginal é baixo), mesmo a melhor estratégia pode apresentar ΔCE não positivo, o que reforça a interpretação de que, em determinados ambientes, o hedge ótimo pode ser economicamente pouco atrativo.

Um ponto adicional revelado pelas métricas do Anexo D é que a aversão ao risco (γ) altera a hierarquia entre alvos *downside*: em níveis mais baixos de γ , alvos menos restritivos (p.ex., τ no 25º percentil) podem entregar ΔCE superior por preservar mais desempenho médio; conforme γ aumenta, a vantagem tende a migrar para alvos mais restritivos (p.ex., τ no 10º percentil), pois a redução de perdas extremas passa a pesar mais na utilidade. Esse comportamento está em linha com o restante do capítulo e ajuda a interpretar porque, em alguns recortes, estratégias mais duras podem parecer conservadoras demais e, ainda assim, serem preferíveis quando a avaliação é feita em bem-estar.

Em conjunto, os anexos mostram que as conclusões do capítulo são robustas a (i) mudanças de portfólio (AE), (ii) mudanças na construção das séries (CM) e (iii) critérios de avaliação econômica (CE/ ΔCE), reforçando que os resultados refletem um mecanismo econômico persistente. Na próxima seção, os achados são consolidados e vinculados às hipóteses do estudo.

4.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS E VALIDAÇÃO DAS HIPÓTESES

Em síntese, os resultados indicam que, quando o problema de hedge incorpora simultaneamente fricções operacionais e a possibilidade de alocação em ativo alternativo, a demanda ótima por hedge se reduz de forma relevante. Em cenários com custos mais elevados e/ou maior participação do ativo alternativo, o hedge pode se tornar economicamente pouco atrativo, levando a soluções próximas de não realizar hedge.

O mecanismo econômico é direto: os custos comprimem o benefício marginal da cobertura e a alternativa de investimento concorre com o hedge na composição do portfólio. Assim, a decisão ótima deixa de ser maximizar cobertura e passa a ser uma escolha condicionada pelo *trade-off* entre proteção e custo, além das oportunidades de diversificação financeira.

Do ponto de vista aplicado, os benchmarks MV/ARRC–MV se mostram referências operacionais mais estáveis sob fricções, enquanto as especificações baseadas em LPM são especialmente úteis para explicitar o papel do risco de cauda (*downside*) e identificar combinações de parâmetros em que a solução ótima migra para cobertura nula ou residual. Para consolidar essa leitura, a Tabela 8 resume a validação das hipóteses e as evidências empíricas associadas.

Tabela 8 - Síntese das hipóteses e evidências empíricas

Hipótese	Descrição	Resultado	Evidência
H1	Custos reduzem h^*	Confirmada	Tabelas 3-5: padrão monotônico LOW $\rightarrow$ BASE $\rightarrow$ HIGH com compressão de h^* ; Figuras 2–3: queda/colapso de h^* sob fricções elevadas; Anexo D (Tabelas 16–23): em cenários de custo mais alto, ΔCE tende a reduzir (ou perder dominância), refletindo o <i>trade-off</i> “proteção $\times$ custo”
H2	w_{alt} reduz h^*	Confirmada	Figuras 4-6: h^* diminui com o aumento de w_{alt} , indicando substituição parcial do hedge por diversificação; Anexo D (Tabelas 19–27): mudanças em w_{alt} alteram o ranking de ΔCE entre estratégias, evidenciando o canal de competição entre hedge e alternativa financeira
H3	Medidas <i>downside</i> reduzem h^*	Confirmada	Figuras 7-12: targets mais conservadores (P25/P10) reduzem h^* e podem levar a $h^* \approx 0$ em cenários severos (especialmente LPM_P10); Anexo D (Tabelas 19–27): em cenários onde o hedge é viável, estratégias <i>downside</i> frequentemente exibem $\Delta CE > 0$ e dominam MV/ARRC–MV em bem-estar
H4	Maior γ aumenta h^*	Confirmada	Tabelas 3 ($\gamma=1$) vs. 5 ($\gamma=5$) e Figuras 10-12: aumento de h^* com γ , condicionado por custos e w_{alt} ; Anexo D (Tabelas 19–27): o perfil de γ altera magnitudes e, em alguns cenários, o modelo dominante em ΔCE , reforçando o papel das preferências na avaliação econômica

Fonte: Resultados da pesquisa.

A confirmação das hipóteses deve ser interpretada no sentido direcional/qualitativo (sinal e padrão), reconhecendo que as magnitudes variam conforme os parâmetros do exercício. As evidências do Anexo D são tratadas como complemento econômico (bem-estar), reforçando a leitura dos padrões observados nas razões ótimas.

Como sintetizado na Tabela 8, as evidências apontam que fricções/custos (H1) e alternativas de alocação (H2) comprimem a cobertura ótima; que um critério sensível a perdas (H3) torna a decisão mais conservadora - podendo levar a soluções próximas de não-hedgear em combinações severas de custo e target -; e que maior aversão ao risco (H4) tende a elevar a cobertura, embora esse efeito seja condicionado por custos e pela competição com o ativo

alternativo. Com isso, encerra-se a validação das hipóteses e prepara-se a transição para a discussão de escopo e limitações.

Apesar de os resultados sustentarem os mecanismos discutidos ao longo do capítulo, algumas limitações devem ser explicitadas. Em primeiro lugar, há restrições de dados e de mercado, especialmente relacionadas à baixa liquidez do futuro de etanol na B3. Isso justifica o uso do portfólio A_ONLY como baseline e implica interpretar o exercício AE principalmente como verificação de robustez, e não como descrição completa de uma estratégia implementável por todas as usinas.

Em segundo lugar, alguns pressupostos de modelagem podem afetar magnitudes. Em particular, a avaliação paramétrica associada às especificações *downside* depende de uma aproximação distributiva baseada nos momentos condicionais estimados (por exemplo, aproximação normal), que pode não capturar integralmente assimetrias e caudas extremas em episódios de estresse. Ainda assim, o desenho empírico mitiga parte desse risco ao trabalhar com volatilidade/covariância condicionais e alvos definidos por percentis.

Por fim, a generalização deve ser feita com cautela: as conclusões se aplicam diretamente ao recorte analisado (mercado brasileiro, período e instrumentos selecionados) e podem mudar com alterações estruturais de liquidez, microestrutura e custos, além de heterogeneidades financeiras e operacionais entre usinas. Essas limitações são retomadas e aprofundadas nas Conclusões, juntamente com extensões naturais para testes adicionais em outros instrumentos e ambientes de mercado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta tese foi investigar como o relaxamento de hipóteses do modelo tradicional de razão ótima de hedge (mínima variância) altera a cobertura ótima nos mercados futuros de açúcar e etanol, a partir de um arcabouço de decisão que incorpora preferências (ARRC), fricções operacionais e alternativas de alocação de riqueza. Os resultados convergem para um achado central: a cobertura ótima é altamente sensível ao ambiente friccional e ao critério de risco adotado. Em particular, fricções e custos comprimem sistematicamente h^* ; a presença de um ativo alternativo reduz a demanda marginal por hedge ao competir pela riqueza alocável; medidas sensíveis a perdas (LPM) tornam a decisão mais conservadora - sobretudo quando a referência se desloca para percentis mais baixos - podendo levar a soluções próximas de não realizar hedge em combinações severas de custo e target; e maior aversão ao risco tende a elevar h^* , embora esse efeito seja condicionado por custos e pela competição com o ativo alternativo. Em termos econômicos, a tese mostra que a redução (até quase zero) de h^* pode ser a resposta ótima quando o *trade-off* proteção $\times$ custo se deteriora, e não uma falha de gestão.

À luz da contribuição tríplice proposta na Introdução, os resultados permitem fechar o ciclo do trabalho em três frentes. Primeiro, a tese integra, em um único problema de decisão, fricções operacionais, competição com ativo alternativo e medidas sensíveis a perdas (LPM) sob preferências parametrizadas, tornando comparável - e economicamente interpretável - o efeito de cada relaxamento sobre o incentivo marginal a realizar hedge. Segundo, ao aplicar esse arcabouço ao setor sucroenergético brasileiro, o estudo aproxima a teoria da realidade operacional, em que custos, rolagem, liquidez e risco de base são elementos constitutivos da decisão, e não apenas ruídos residuais. Terceiro, ao identificar as regiões do espaço de parâmetros em que o hedge deixa de ser economicamente viável, a tese oferece um diagnóstico objetivo de inviabilidade econômica (e não apenas estatística) da proteção, sobretudo quando

critérios sensíveis a perdas entram em cena. Em termos aplicados, isso explicita a mensagem central do trabalho: em determinados ambientes de custo e restrição, não realizar hedge pode ser uma política ótima.

Os achados dialogam diretamente com a literatura que relaxa a formulação de mínima variância ao incorporar fricções, alternativas de investimento e preferências/medidas de risco. O padrão de compressão de h^* sob custos e a redução adicional quando existe um ativo alternativo são consistentes com o fato de que o hedge deixa de ser uma escolha gratuita e passa a disputar recursos com outras estratégias de alocação. De modo semelhante, ao substituir um critério simétrico por medidas sensíveis a perdas (LPM), os resultados reforçam que o critério de decisão não apenas altera magnitudes, mas pode mudar qualitativamente a solução - de cobertura parcial para quase nulidade - quando a proteção contra perdas extremas se torna o foco. Nesse sentido, a tese contribui ao organizar esses mecanismos em um mesmo arcabouço aplicado, permitindo comparar, de forma transparente, quando o hedge ótimo é determinado por covariâncias (MV), quando é disciplinado por preferências (ARRC) e quando funciona como diagnóstico de fragilidade econômica sob perdas (LPM).

Do ponto de vista prático, os resultados sugerem implicações diretas para usinas e para o desenho de mercado. Para as usinas, a decisão de realizar hedge depende criticamente do perfil de custos (margem, rolagem, rebalanceamento) e da folga financeira: unidades mais restritas em caixa ou expostas a custos operacionais elevados podem racionalmente optar por cobertura menor - ou mesmo por não realizar hedge - sem que isso represente, por si, ineficiência gerencial. Além disso, o maior peso econômico de medidas sensíveis a perdas indica que políticas internas de risco focadas em proteção de cauda (por exemplo, limites de perda, restrições baseadas em *drawdowns*, *covenants* pró-cíclicos) podem induzir estratégias mais conservadoras justamente quando o hedge se torna mais oneroso, exigindo coordenação entre

gestão de risco e planejamento financeiro. Para agentes de infraestrutura e reguladores, as conclusões reforçam que ampliar liquidez, reduzir fricções operacionais e melhorar condições de rolagem - particularmente no etanol - expande o conjunto de cenários em que o hedge é economicamente viável e eleva os ganhos de bem-estar potenciais, aproximando a prática do hedge desejável que modelos sem fricções implicitamente pressupõem.

As conclusões devem ser lidas à luz de limitações que afetam magnitudes e escopo. Em primeiro lugar, há restrições de dados e de mercado, especialmente associadas à baixa liquidez do futuro de etanol na B3, o que recomenda interpretar exercícios com etanol sobretudo como verificação de robustez e não como descrição universal de uma estratégia plenamente implementável por qualquer usina. Em segundo lugar, alguns pressupostos de modelagem influenciam resultados, pois a avaliação paramétrica associada às especificações LPM depende de uma aproximação distributiva baseada em momentos condicionais, que pode não capturar integralmente caudas e assimetrias em episódios de estresse, ainda que o desenho empírico mitigue parte desse risco ao trabalhar com alvos definidos por percentis e com volatilidade/covariância condicionais. Em terceiro lugar, a generalização deve ser feita com cautela, já que os resultados se aplicam diretamente ao recorte analisado (mercado brasileiro, período e instrumentos selecionados) e podem mudar com alterações estruturais de microestrutura, custos e heterogeneidades financeiras e operacionais entre usinas. Adicionalmente, há uma limitação conceitual inevitável: ao sintetizar a decisão em um arcabouço de portfólio, a análise abstrai de dimensões institucionais que podem ser determinantes na prática - como restrições de crédito e margem endógenas, governança interna de risco e limites operacionais -, o que sugere cautela ao transportar magnitudes como regra, ainda que os mecanismos qualitativos permaneçam informativos.

Uma agenda natural de pesquisa é aprofundar a robustez dos resultados relaxando hipóteses adicionais e aproximando o arcabouço do ambiente institucional. Em termos econométricos, é promissor avaliar medidas sensíveis a perdas com abordagens não paramétricas ou semiparamétricas para capturar caudas e assimetrias, bem como explorar otimização contínua (em vez de grade) para reduzir irregularidades locais. Em termos de mercado e instrumentos, extensões incluem incorporar opções, bases alternativas, cross-hedge e múltiplos horizontes de rolagem; testar estabilidade dos mecanismos em subperíodos (calmaria versus estresse); e introduzir heterogeneidade explícita entre usinas, aproximando o modelo de restrições financeiras, políticas internas e diferenças de acesso a liquidez. Por fim, investigar como mudanças de liquidez e microestrutura no etanol alterariam o espaço de viabilidade do hedge conecta o resultado central da tese a uma agenda aplicada relevante para o mercado doméstico.

Em síntese, esta tese reforça que a razão ótima de hedge não é apenas um objeto estatístico, mas uma escolha econômica condicionada por fricções, competição por capital e pelo tipo de risco que o agente efetivamente busca evitar. Ao trazer esses elementos para o centro da análise no setor sucroenergético, o trabalho ajuda a interpretar coberturas parciais - e até a decisão de não realizar hedge - como respostas potencialmente racionais a ambientes de custo, liquidez e restrição. Assim, o resultado central retorna à motivação inicial: aproximar a teoria de hedge da realidade operacional do setor, em que a viabilidade da proteção é tão importante quanto sua eficácia.

REFERÊNCIAS

ABREU, E. Apostila CPA-20 Certificação Profissional ANBIMA. 2018.

ANDERSON, R. W.; DANTHINE, J. **Cross Hedging**. Journal of Political Economy, V.89, p.1182-1196, 1981.

ARROW, K. J. **Aspects of the Theory of Risk-Bearing**. Helsinki: Yrjö Jahnsson Foundation, 1965.

B3 (Brasil, Bolsa, Balcão). Relatório Mensal de Commodities – Etanol. B3, 2025.

BAER, W. **A Economia Brasileira**. São Paulo: Nobel, 416p, 1996.

BAFFES, J.; NAGLE, P. **Commodity Markets: Evolution, Challenges, and Policies**. Washington, DC: World Bank. 2022.

BAILLIE, R. T.; MYERS, R. J. **Bivariate GARCH estimation of the optimal commodity futures hedge**. Journal of Applied Econometrics, v. 6, n. 2, p. 109-124, 1991.

BARKLEY, A.; BARKLEY, P. W. **Principles of Agricultural Economics**. Routledge, 2013.

BAWA, V. S. Safety first, stochastic dominance, and optimal portfolio choice. **Journal of Financial and Quantitative Analysis**, Seattle, v. 13, n. 2, p. 255–271, June 1978.

BENEDITO, J. E. **Fundo Setorial de Agronegócio: Caracterização, Análise e Perspectivas de Impactos**. Brasília, 2010. 223 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília.

BERA, A. K.; JARQUE, C. M. **Efficient tests for normality, homoscedasticity and serial independence of regression residuals**. Economics Letters, v. 6, n. 3, p. 255-259, 1981.

BOISSIEU, C., AGLIETTA, M. Les marchés dérivés de Gré à Gré et le risqué systémique. Bulletin COB, Paris, n. 283, set. 1994.

BOLLERSLEV, T. **Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity**. Journal of Econometrics Volume 31, Issue 3, April 1986, Pages 307-327

BROWN, S. L. A reformulation of the portfolio model of hedging. **American Journal of Agricultural Economics**, New York, v. 67, n. 3, p. 508-512, Aug. 1985.

BOURGUINAT, H. La tyrannie des marchés – Essai sur l'économie virtuelle. Paris: Economica, 1995.

CALEGARI, I. P.; BAIGORRI, M. C.; FREIRE, F. S. Os derivativos agrícolas como uma ferramenta de gestão do risco de preço. Custos e @gronegócio online - v. 8, Especial. Nov - 2012.

CALDERON, P. H. G. **Mercado Futuro de Açúcar da BM&F: Influência de cross hedges e da taxa de juros**. Piracicaba, 2001. 87 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

CARDOSO, V. J.; SILVA, U. P.; AMBROZINI, M. A. **A influência dos preços dos produtos finais sobre os custos de produção em uma usina sucroalcooleira**. Nucleus, v.8, n.1, abr.2011.

CARDOSO, G. L.; LIMA, J. G. de S., LOPES, L. F. do N., CARVALHO, L. G. da S. de. **A Importância da Agropecuária para a Economia do Brasil no Século XXI**. Trabalho de Conclusão de Curso em Economia - Universidade São Judas Tadeu, São Paulo. 2022.

CARVALHO, L. N. Uma Contribuição à Auditoria do Risco de Derivativos. São Paulo, 1996, 155 p. Tese de Doutorado em Contabilidade apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo.

CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada.

CEPEA. Sucroenergético 360 – edição de abril de 2025. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA/ESALQ-USP), 2025.

CHEN, S.; LEE, C.; SHRESTHA, K. Futures hedge ratios: a review. **The Quartely Review of Economics and Finance**, Urbana-Champaign, v. 43, n. 3, p. 433-465, 2003.

COLLINS, R. A; GBUR, E. E. Quadratic utility and linear mean-variance: a pedagogic note. **Review of Agricultural Economics**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 289-291, July 1991.

COLMAN, D.; YOUNG, T. **Principles of agricultural economics**. Cambridge University Press, 1989.

CRUZ JÚNIOR, J. C.; MARQUES, P. V.; MARTINES FILHO, J.G. **Razão de hedge ótima de mínimo MPI (momento parcial inferior) no mercado futuro de boi gordo na BM&F**. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. Anais. Brasília: SOBER, 2008

CRUZ JÚNIOR, J. C. **Modelo de razão de Hedge ótima e percepção subjetiva de risco nos mercados futuros**. Piracicaba, 2009. 100 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

DAVIS, H. A. **Project Finance: Practical Case Studies**. Euromoney Books, V1, Ed. 2, 2003.

EDERINGTON, L. H. The hedging performance of the new futures markets. **The Journal of Finance**, Chicago, v. 34, n. 1, p. 157-170, Mar. 1979.

EFTEKHARI, B. **Lower partial moment hedge ratios**. Applied Financial Economics, London, v.8, n. 6, p. 645-652, Dec. 1998.

ENGLE, R. F. **Dynamic conditional correlation: a simple class of multivariate GARCH models**. Journal of Business & Economic Statistics, v. 20, n. 3, p. 339-350, 2002.

FARHI, M. Derivativos financeiros: hedge, especulação e arbitragem. Economia e Sociedade, Campinas, (13): 93-114, dez, 1999.

FISHBURN, P. C. Mean-risk analysis with risk associated with below-target returns. **The American Economic Review**, Nashville, v. 67, n. 2, p. 116-126, Mar. 1977.

GASQUES, J. G.; VILLA VERDE, C. M.; BASTOS, E. T. Gastos Públicos em Agricultura: Retrospectiva e Prioridades. Brasília: IPEA, 2006.(Texto para Discussão 1.225) Disponível

em:<http://www.ipea.gov.br/sites/000/2/publicacoes/tds/td_1225.pdf>. Acesso em março de 2023.

GATTI, S. **Project Finance in Theory and Practice: Designing, Structuring, and Financing Private and Public Projects**. Academic Press, Elsevier, 2008.

GEMAN, H.; OHANA, S. Time-consistency in managing a commodity portfolio: A dynamic risk measure approach. *Journal of Banking Finance*, v. 32, n.10, p.1991-2005, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbankfin.2007.05.020>

GEMAN, H. **Agricultural Finance: From Crops to Land, Water and Infrastructure**. John Wiley & Sons, 29 de dez. de 2014.

GIACHINI, G. F. Análise de bolhas especulativas nos mercados futuros: evidências para o mercado de petróleo, gasolina, etanol e açúcar. 2022. 66p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

GIEHLER, T. Sources of Funds for Agricultural Lending. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), No. 4, 1999.

HARLOW, W. V.; RAO, R. K. **Asset pricing in a generalized mean-lower partial moment framework: theory and evidence**. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*, v. 24, n. 3, p. 285-311, 1989.

HICKS, J. R. **Value and Capital**. Oxford University Press, Ed. 2, 1946.

HIERONYMUS, T. A. Economics of futures trading. New York: Ed. Commodity Research Bureau, 1976.

HULL, J. Opções, Futuros e Outros Derivativos. 3ª ed. - São Paulo, SP: BM&F, 1998.

HULL, J. C. Fundamentos dos Mercados Futuros e de Opções. São Paulo: Bolsa de Mercadorias e Futuros, 2005.

ICE (Intercontinental Exchange). Sugar No. 11 Futures: Contract Specifications / Product Guide. Atlanta: ICE Futures U.S., 2025.

INGERSOLL, J. E. **Theory of financial decision making**. Maryland: Rowman & Littlefield Publishers Inc., 1987. 449 p.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

JACOB, R. M. **O uso dos derivativos financeiros como estratégia de proteção de preço aplicado pelas usinas de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, no período de 2003 a 2009**. 2010. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2010.

JESSOP, R.; DIALLO, B.; DUURSMA, M.; MALLEK, A.; HARMS, J.; MANEN, B. Creating Access to Agricultural Finance. AFD. 2012.

JOHNSON, L. **The Theory of Hedging and Speculation in Commodity Futures**. Review of Economic Studies, V.27, p.139-151, 1960.

J.P. MORGAN. **RiskMetrics – Technical Document**. 4. ed. New York: J.P. Morgan, 1996.

KALDOR, N. Speculation and economic stability. Review of Economic Studies, v. 7, n.1, 1939.

KEYNES, J. M. **A treatise on Money**. Macmillan, V.1, 1930.

KIMURA, H. Administração de Riscos em Empresas Agropecuárias e Agroindustriais.

Caderno de Pesquisas em Administração, v. 1, n. 7, 2. trim. 1998.

KINDLEBERGER, C. P. Manias, panics and crashes. New York: Basic Books, 1989.

LEITE, C. A. M.; JESUS, R. B.; PROCÓPIO, D. P. Análise comparativa da cadeia sucroalcooleira nos estados do Paraná e São Paulo. In. CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 48., Campo Grande. 2010.

LENCE, S. H. Relaxing the assumptions of minimum-variance hedging. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, Fargo, v. 21, n. 1, p. 39-55, July 1996.

LEUTHOLD, R. M.; JUNKUS, J. C.; CORDIER, J. E. **The theory and practice of futures markets**. Lexington: Lexington Books, 1989. 410 p.

LIEN, D.; TSE, Y. K. Hedging downside risk with futures markets. **Applied Financial Economics**, London, v. 10, n. 2. p. 163-170, Apr. 2000.

LOPES, A. P. **A importância dos derivativos no gerenciamento de riscos no mercado de commodities agrícolas: um estudo focado na financeirização do setor sucroalcooleiro**. 2024. 40 f. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Instituto de Ciências Sociais e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, Mariana, 2024.

MARDIA, K. V. **Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications**. *Biometrika*, v. 57, n. 3, p. 519-530, 1970.

MARKOWITZ, H. The utility of wealth. **The Journal of Political Economy**, Chicago, v. 60, n. 2, p. 151-158, Apr. 1952.

MARTINS, A. G.; AGUIAR, D. R. D. Efetividade do hedge de soja em grão brasileira com contratos futuros de diferentes vencimentos na Chicago Board Of Trade. *Revista de Economia e Agronegócio*, v. 2, n. 4, p. 449-472, nov. 2004.

MATOS, E. B. **Análise e Gerenciamento de Riscos**. São Paulo, 1998, 180 p. Dissertação de Mestrado em Administração apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo.

MATTOS, F.; GARCIA, P.; NELSON, C. H. Relaxing standard hedging assumptions in the presence of downside risk. **Quartely Review of Economics and Finance**, Urbana-Champaign, v. 48, n. 1, p. 78-93, 2008.

MELO, C. **Agronegócio Brasileiro: Evolução das Linhas de Crédito**. Goiânia, 2022. 46 p. Monografia (Graduação) – Escola de Direito, Negócios e Comunicação, Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

MENDES, A. P.; SOUZA, J. B. **Mercados de derivativos e gestão de risco no setor sucroalcooleiro**. Rio de Janeiro: Editora AgroFinance, 2003.

MENDES, T. D. O. **Produção Suco-Alcooleira: Estratégias Financeiras e Operacionais**. São Paulo, 2010. 120 p. Monografia (Graduação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo.

MENEZES, R. da N. **Instrumentos de Aplicação Financeira Utilizados pelas Empresas Brasileiras de Capital Aberto do Setor Econômico de Consumo Cíclico do Subsetor de Comércio, entre o período de 2014 e 2018**. Fortaleza, 2019. 41 p. Monografia (Graduação) – Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará.

MEYER, J. Two-moment decision models and expected utility maximization. **The American Economic Review**, Nashville, v. 77, n. 3, p. 421-430, June 1987.

MILLER, C.; JONES. L. **Agricultural Value Chain Finance: Tools and Lessons**. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Practical Action Publishing. 2010.

MORAES, M. A. F. D. **A desregulamentação do setor sucroalcooleiro brasileiro**. Piracicaba, 1999. 292p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

MYERS, R. J.; THOMPSON, S. R. Generalized optimal hedge ratio estimation. **American Journal of Agricultural Economics**, Chicago, v. 71, n. 4, p. 858-868, 1989.

NELSON, C. H.; ESCALANTE, C. Toward exploring the location-scale condition: a constant relative risk aversion location scale objective function. **European Review of Agricultural Economics**, Oxford, v. 31, n. 3, p. 273-287, Sep. 2004.

NORTON, R. D. **Agricultural development policy: concepts and experiences**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004.

OBST, W. J.; GRAHAM, R.; CHRISTIE, G. Financial Management for Agribusiness. Landlinks Press, 2007.

ORSOLINI, R. Alocação de Capital – Um Enfoque de Avaliação de Desempenho Ajustado ao Risco em Bancos. São Paulo, 2000, 215 p. Dissertação de Mestrado em Ciências Contábeis apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo.

PEYRELEVADE, J. L'économie de spéculation. Paris: Ed. Seuil, 1978.

PINA, H. **A agroindústria açucareira e sua legislação**. São Paulo: Apec, 1972, 364 p.

PINHEIRO, M. C.; ZANON, A. R. M.; DANTAS, J. A.; FERNANDES, B. V. R. Utilização de contratos futuros de commodities como forma de otimizar carteiras de investimento do mercado brasileiro. Revista Evidenciação Contábil & Finanças, ISSN 2318-1001, João Pessoa, v.7, n.3, p.5-23. 2019.

PLIHON, D. La montée en puissance de la finance spéculative. Campinas: UNICAMP. Instituto de Economia, 1995. (Mimeogr.)

PRATT, J. W. **Risk aversion in the small and in the large**. Econometrica, v. 32, n. 1-2, p. 122-136, 1964.

RAIFUR, L., GARCIAS, P. M. A Economia dos Custos de Transação e as transações no mercado de derivativos agropecuários. XV Congresso Brasileiro de Custos – Curitiba - PR, Brasil, 12 a 14 de novembro de 2008.

RFA. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/>>. Acesso em julho de 2025.

RIBEIRO, C. O.; OLIVEIRA, S. M.; MENDES, T. O. **Produção Sucroalcooleira: Estratégias Financeiras e Operacionais**. Revista Produção Online, Florianópolis, SC, v.14, n. 4, p. 1270-1291, out./dez. 2014.

ROSSI, C. A. Análise de Estratégias de Hedging Estáticas Aplicadas a Commodities Agrícolas. São Paulo, 2008, 151 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SANTOS, R. R.; MAIA, S. F.. Razão ótima e efetividade de hedge do etanol hidratado nos contratos futuros de commodities sucroalcooleiras. Revista Brasileira de Administração Científica, v.7, n.2, p.33-48, 2016. DOI: <http://doi.org/10.6008/SPC2179-684X.2016.002.0003>

SANTOS, R. R. **Cross Hedge entre Etanol e Açúcar no Brasil: Uma Análise de Razão Ótima e Efetividade**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.

SAUNDERS, A. Administração de Instituições Financeiras. São Paulo: Editora Atlas, 2000.

SCHEDENFFELDT, B. F.; LIMA, A. T. de; LEVRERO, G. R. R.; MONTEBELLO, A. E. S. Instrumentos privados de financiamento do agronegócio. **Revista de Política Agrícola**. No 1 – jan./fev./mar. 2021

SHARPE, W. F. **Mutual fund performance**. Journal of Business, v. 39, n. 1, p. 119-138, 1966.

SILVA, E. P. S.; AMARAL, C. A. L. V.; CASTRO, L. B.; ARAUJO, L. G. Instrumentos Derivativos para o Agronegócio: Mistificação ou Solução. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Rio Branco – Acre, 20 a 23 de julho de 2008.

SILVA, T. A.; NETO, O. J. de O.; MACHADO, W. B. Gestão do Risco do Preço do Açúcar para os Principais Estados Produtores Brasileiros no Mercado Futuro da BM&FBOVESPA. **REVISTA GESTÃO, INOVAÇÃO E NEGÓCIOS** – N.2, V.2, 2016.

SILVA, M. S. C. da. Análise do Mercado de Trabalho do Setor Sucroenergético do Brasil. Boletim de Economia Empírica, vol. II, nº X, ISSN 2675-3391. 2020.

SORTINO, F. A.; VAN DER MEER, R. **Downside risk**. Journal of Portfolio Management, v. 17, n. 4, p. 27-31, 1991.

STEIN, J. L. The simultaneous determination of spot and futures prices. **The American Economic Review**, Nashville, v. 51, n. 5, p. 1012-1025, Dec. 1961.

TURVEY, C. G.; NAYAK, G. The semivariance-minimizing hedge ratio. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, Fargo, v. 28, n. 1, p. 100-115, Apr. 2003.

TILL, H. **Case Studies and Risk Management in Commodity Derivatives Trading**. EDHEC Business School, 2011.

UNCTAD. Disponível em: <<https://unctad.org/>>. Acesso em julho de 2025.

UNSER, M. **Lower partial moments as measures of perceived risk: an experimental study**. *Journal of Economic Psychology*, v. 21, n. 3, p. 253-280, 2000.

USDA. Disponível em: <<https://www.usda.gov/>>. Acesso em julho de 2025.

WANG, Z. **Commodity Derivatives: Modeling and Pricing. Economics and Finance**. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.

WORKING, H. **Futures trading and hedging**, *The American Economic Review*, V.43, p.314-343, 1953.

ANEXO A – CENÁRIOS DO PORTFÓLIO AE (COM FUTURO DE ETANOL)

Tabela 9 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 1$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,8865	0,3622	0,3257	0,3257	0,3257	0,3257
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,3536	0,3257	0,3257	0,3257	0,3257
$w_{alt} = 25\%$		0,3364	0,3257	0,3136	0,2525	0,2452
$w_{alt} = 50\%$		0,3257	0,2452	0,2452	0,2452	0,2452
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,3861	0,2452	0,2452	0,2452	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,3509	0,2113	0,0766	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,3126	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,3791	0,2452	0,2452	0,2452	0,1648
$c_t = \text{BASE}$		0,3246	0,1477	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,2819	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,3621	0,2452	0,2452	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,2622	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,3089	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,2587	0,0766	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,3105	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5736	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 10 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 3$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,8865	0,4368	0,3797	0,3770	0,3501	0,3257
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,4206	0,3680	0,3631	0,3292	0,3257
$w_{alt} = 25\%$		0,3882	0,3414	0,3314	0,2860	0,2452
$w_{alt} = 50\%$		0,3551	0,2653	0,2452	0,2452	0,2452
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,4688	0,2452	0,2452	0,2452	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,5051	0,2167	0,1036	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5198	0,0111	0,0000	0,0000	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,4579	0,2452	0,2452	0,2452	0,1648
$c_t = \text{BASE}$		0,4887	0,1576	0,0274	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5055	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,4407	0,2452	0,2417	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,4565	0,0210	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5016	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,3891	0,0906	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,4418	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,6137	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 11 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, $\gamma = 5$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,8865	0,5162	0,4063	0,4021	0,3693	0,3422
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,4968	0,3856	0,3822	0,3527	0,3257
$w_{alt} = 25\%$		0,4577	0,3674	0,3604	0,2959	0,2504
$w_{alt} = 50\%$		0,3942	0,2905	0,2698	0,2452	0,2452
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,5335	0,3085	0,2730	0,2452	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,5602	0,2088	0,1278	0,0100	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5710	0,0294	0,0000	0,0000	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,5220	0,2717	0,2452	0,2452	0,1775
$c_t = \text{BASE}$		0,5521	0,1680	0,0462	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5632	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,5009	0,2452	0,2331	0,1808	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,5336	0,0346	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5546	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,4543	0,1005	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,5044	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,6251	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

ANEXO B – ABORDAGEM DE MATURIDADE CONSTANTE (CM)

Tabela 12 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + A ONLY, $\gamma = 1$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,9916	0,7942	0,7476	0,7466	0,7459	0,7447
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,7901	0,7463	0,7461	0,7448	0,7433
$w_{alt} = 25\%$		0,7821	0,7454	0,7449	0,6946	0,6667
$w_{alt} = 50\%$		0,7579	0,6715	0,6667	0,5785	0,5785
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,8032	0,6547	0,5975	0,4780	0,2774
$c_t = \text{BASE}$		0,8112	0,4609	0,3183	0,2350	0,1648
$c_t = \text{HIGH}$		0,7978	0,2825	0,1845	0,0620	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8015	0,6176	0,5369	0,3797	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,8062	0,3813	0,2636	0,1693	0,0766
$c_t = \text{HIGH}$		0,7801	0,2155	0,1248	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,7983	0,5209	0,4202	0,2452	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,7829	0,2651	0,1836	0,0766	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,7391	0,1230	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,7688	0,2452	0,2224	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,6707	0,0557	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,6385	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 13 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + A_ONLY, $\gamma = 3$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,9916	0,9352	0,8276	0,8211	0,7699	0,7460
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,9212	0,8091	0,8023	0,7585	0,7448
$w_{alt} = 25\%$		0,8934	0,7957	0,7898	0,7207	0,6749
$w_{alt} = 50\%$		0,8321	0,7324	0,7081	0,6117	0,5785
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,9377	0,7552	0,7184	0,5661	0,3421
$c_t = \text{BASE}$		0,9376	0,6179	0,5067	0,2939	0,1705
$c_t = \text{HIGH}$		0,9434	0,4654	0,3429	0,1185	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,9243	0,7252	0,6686	0,4696	0,2673
$c_t = \text{BASE}$		0,9244	0,5391	0,4312	0,2158	0,0844
$c_t = \text{HIGH}$		0,9333	0,3957	0,2518	0,0170	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8976	0,6380	0,5536	0,2941	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,9003	0,4202	0,2886	0,1088	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,8977	0,2429	0,0507	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8109	0,3622	0,2566	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,7979	0,1092	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,7844	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 14 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + A_ONLY, $\gamma = 5$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,9916	0,9800	0,9069	0,8978	0,7903	0,7566
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,9715	0,8852	0,8732	0,7779	0,7455
$w_{alt} = 25\%$		0,9542	0,8432	0,8319	0,7443	0,6868
$w_{alt} = 50\%$		0,9024	0,7810	0,7612	0,6248	0,5785
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,9801	0,8275	0,7848	0,6295	0,3743
$c_t = \text{BASE}$		0,9789	0,7145	0,6441	0,3598	0,1867
$c_t = \text{HIGH}$		0,9793	0,5935	0,4626	0,1818	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,9715	0,7834	0,7423	0,5300	0,2955
$c_t = \text{BASE}$		0,9701	0,6610	0,5546	0,2649	0,0998
$c_t = \text{HIGH}$		0,9726	0,4957	0,3831	0,0587	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,9542	0,7256	0,6624	0,3402	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,9549	0,5081	0,4024	0,1351	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,9574	0,3661	0,1743	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,8950	0,4483	0,3281	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,8904	0,1887	0,0223	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,8843	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 15 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + AE, $\gamma = 1$.

Retorno, $EM = AL$, $\gamma = 1$.						
Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>				
		zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil	
Modelo Padrão (1)						
0,8997	0,3622	0,3257	0,3257	0,3257	0,3257	
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$	0,3536	0,3257	0,3257	0,3257	0,3257	
$w_{alt} = 25\%$	0,3364	0,3257	0,3138	0,2526	0,2452	
$w_{alt} = 50\%$	0,3257	0,2452	0,2452	0,2452	0,2452	
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$	0,3862	0,2452	0,2452	0,2452	0,2452	
$c_t = \text{BASE}$	0,3514	0,2111	0,0766	0,0000	0,0000	
$c_t = \text{HIGH}$	0,3154	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$	0,3795	0,2452	0,2452	0,2452	0,1648	
$c_t = \text{BASE}$	0,3250	0,1477	0,0000	0,0000	0,0000	
$c_t = \text{HIGH}$	0,2842	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$	0,3623	0,2452	0,2452	0,1648	0,0000	
$c_t = \text{BASE}$	0,2641	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$c_t = \text{HIGH}$	0,3109	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$	0,2589	0,0766	0,0000	0,0000	0,0000	
$c_t = \text{BASE}$	0,3113	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
$c_t = \text{HIGH}$	0,5743	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 16 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + AE, $\gamma = 3$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,8997	0,4399	0,3798	0,3771	0,3501	0,3257
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,4233	0,3680	0,3631	0,3291	0,3257
$w_{alt} = 25\%$		0,3904	0,3414	0,3314	0,2860	0,2452
$w_{alt} = 50\%$		0,3552	0,2654	0,2452	0,2452	0,2452
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,4736	0,2452	0,2452	0,2452	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,5098	0,2165	0,1140	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5237	0,0126	0,0000	0,0000	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,4607	0,2452	0,2452	0,2452	0,1648
$c_t = \text{BASE}$		0,4920	0,1578	0,0325	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5089	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,4432	0,2452	0,2411	0,1648	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,4593	0,0240	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5049	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,3902	0,0906	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,4432	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,6145	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 17 - Resumo dos resultados utilizando a estratégia de hedge para os quatro modelos de retorno, CM + AE, $\gamma = 5$.

	Mínima Variância	ARRC média variância	ARRC <i>downside risk</i>			
			zero	50° percentil	25° percentil	10° percentil
Modelo Padrão (1)						
	0,8997	0,5193	0,4093	0,4050	0,3693	0,3422
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo (2)						
$w_{alt} = 10\%$		0,4996	0,3857	0,3823	0,3527	0,3257
$w_{alt} = 25\%$		0,4599	0,3674	0,3604	0,2959	0,2504
$w_{alt} = 50\%$		0,3950	0,2907	0,2699	0,2452	0,2452
Modelo padrão com custos de transação (3)						
$c_t = \text{LOW}$		0,5386	0,3087	0,2732	0,2452	0,2452
$c_t = \text{BASE}$		0,5652	0,2086	0,1419	0,0108	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5768	0,0352	0,0000	0,0000	0,0000
Modelo padrão com investimento em ativo alternativo e custo de transação (4)						
$w_{alt} = 10\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,5266	0,2720	0,2452	0,2452	0,1775
$c_t = \text{BASE}$		0,5574	0,1681	0,0541	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5684	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 25\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,5046	0,2452	0,2327	0,1809	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,5379	0,0408	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,5605	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$w_{alt} = 50\%$						
$c_t = \text{LOW}$		0,4555	0,1057	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{BASE}$		0,5056	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$c_t = \text{HIGH}$		0,6260	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fonte: Resultados da pesquisa.

ANEXO C – DIAGNÓSTICOS

Tabela 18 - Testes de diagnóstico.

Teste	Série	Assimetria	Curtose	Estatística	p-valor
Jarque–Bera	Retorno spot açúcar (IS, diário)	-1,12370	19,59270	42.265,62710	0,00000
Jarque–Bera	Retorno futuro açúcar (IS, diário)	-0,20120	6,21880	1.586,28620	0,00000
Jarque–Bera	Retorno ativo alternativo (IS, diário)	-0,80370	15,47110	23.835,40350	0,00000
Mardia (assimetria)	Vetor (spot, futuro, alternativo)			2,35720	0,00000
Mardia (curtose)	Vetor (spot, futuro, alternativo)			54,65240	0,00000
Ljung–Box	Resíduo padronizado (spot)			158,53650	0,00000
Ljung–Box	Resíduo padronizado (futuro)			13,45580	0,19930
Ljung–Box	Resíduo padronizado (alternativo)			6,09250	0,80740
Ljung–Box (resíduos ²)	Resíduo padronizado (spot)			0,19720	1,00000
Ljung–Box (resíduos ²)	Resíduo padronizado (futuro)			10,85700	0,36880
Ljung–Box (resíduos ²)	Resíduo padronizado (alternativo)			34,55250	0,00010
ARCH–LM	Resíduo padronizado (spot)			0,19890	1,00000
ARCH–LM	Resíduo padronizado (futuro)			10,45190	0,40180
ARCH–LM	Resíduo padronizado (alternativo)			31,15680	0,00060

Fonte: Resultados da pesquisa.

Os testes de Mardia confirmam a ausência de normalidade multivariada ($p < 0,01$), validando a escolha da distribuição t-Student no modelo GARCH para acomodar o excesso de curtose. A dinâmica das interdependências entre os ativos foi capturada via EWMA sobre os resíduos padronizados, permitindo que a matriz de covariância responda rapidamente a choques recentes de mercado. Além disso, a robustez do modelo é verificada pelo teste ARCH-LM nos resíduos do spot ($p = 1,00$), garantindo que a volatilidade condicional foi adequadamente filtrada, restando apenas as assimetrias e caudas pesadas que justificam a aplicação dos modelos de risco downside (LPM).

ANEXO D – MÉTRICAS

Tabela 19 - Métricas para cenário LOW e $w_{alt} = 10\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,04591	-0,02445	-0,02146	-0,00018	0,00805	0,27999	-0,02002	-0,02279	-0,02135
1	ARRC_MV	-0,10105	-0,09123	-0,00982	-0,00039	0,01039	0,04290	-0,02511	-0,03469	-0,03264
1	ARRC_LPM_Zero	-0,10808	-0,09745	-0,01062	0,03186	0,01196	0,21146	-0,02789	-0,02808	-0,02564
1	ARRC_LPM_P50	-0,13115	-0,09777	-0,03337	0,03186	0,01239	0,21146	-0,02864	-0,03218	-0,03014
1	ARRC_LPM_P25	-0,12460	-0,09855	-0,02604	0,03186	0,01307	0,21146	-0,02888	-0,02770	-0,02750
1	ARRC_LPM_P10	-0,11495	-0,10003	-0,01492	-0,13904	0,01404	0,02206	-0,02931	-0,02542	-0,02632
3	MV	-0,04591	-0,02445	-0,02146	-0,00018	0,00805	0,27999	-0,02002	-0,02279	-0,02135
3	ARRC_MV	-0,07427	-0,05728	-0,01699	-0,00028	0,00940	0,13195	-0,02251	-0,02985	-0,02873
3	ARRC_LPM_Zero	-0,08878	-0,08710	-0,00168	0,03186	0,01116	0,25834	-0,02596	-0,02622	-0,02343
3	ARRC_LPM_P50	-0,10073	-0,08799	-0,01274	0,03186	0,01147	0,21146	-0,02660	-0,02829	-0,02568
3	ARRC_LPM_P25	-0,12497	-0,09596	-0,02900	0,03186	0,01259	0,21146	-0,02852	-0,02970	-0,02840
3	ARRC_LPM_P10	-0,11929	-0,09844	-0,02085	-0,13904	0,01386	0,02206	-0,02922	-0,02680	-0,02770
5	MV	-0,04591	-0,02445	-0,02146	-0,00018	0,00805	0,27999	-0,02002	-0,02279	-0,02135
5	ARRC_MV	-0,06445	-0,04728	-0,01716	-0,00025	0,00901	0,17096	-0,02195	-0,02786	-0,02663
5	ARRC_LPM_Zero	-0,08339	-0,06511	-0,01828	0,11031	0,01072	0,24890	-0,02527	-0,02645	-0,02398
5	ARRC_LPM_P50	-0,08625	-0,06770	-0,01855	0,03186	0,01104	0,25734	-0,02582	-0,02599	-0,02280
5	ARRC_LPM_P25	-0,11524	-0,09435	-0,02089	0,03186	0,01225	0,21146	-0,02802	-0,02872	-0,02699
5	ARRC_LPM_P10	-0,12226	-0,09847	-0,02379	-0,10555	0,01361	0,02172	-0,02904	-0,02766	-0,02835

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 20 - Métricas para cenário BASE e $w_{alt} = 10\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,05057	-0,02445	-0,02612	-0,00019	0,00803	0,13426	-0,02002	-0,02542	-0,02373
1	ARRC_MV	-0,09065	-0,09123	0,00058	-0,03957	0,01052	0,15260	-0,02520	-0,03013	-0,02812
1	ARRC_LPM_Zero	-0,14362	-0,09745	-0,04616	-0,04622	0,01322	0,02216	-0,02910	-0,03505	-0,03516
1	ARRC_LPM_P50	-0,08636	-0,09777	0,01141	-0,00033	0,01413	0,02336	-0,02973	-0,01408	-0,01379
1	ARRC_LPM_P25	-0,03722	-0,09855	0,06134	-0,00014	0,01461	0,02336	-0,02964	-0,00290	-0,00268
1	ARRC_LPM_P10	-0,07312	-0,10003	0,02691	-0,00028	0,01491	0,02336	-0,03035	-0,00955	-0,00969
3	MV	-0,05057	-0,02445	-0,02612	-0,00019	0,00803	0,13426	-0,02002	-0,02542	-0,02373
3	ARRC_MV	-0,07868	-0,05728	-0,02140	-0,00030	0,00925	0,03302	-0,02247	-0,03241	-0,03106
3	ARRC_LPM_Zero	-0,14177	-0,08710	-0,05467	-0,04022	0,01232	0,02175	-0,02862	-0,03785	-0,03634
3	ARRC_LPM_P50	-0,12657	-0,08799	-0,03858	0,15343	0,01301	0,02332	-0,02953	-0,02966	-0,02873
3	ARRC_LPM_P25	-0,06088	-0,09596	0,03509	-0,00023	0,01428	0,02336	-0,02968	-0,00834	-0,00814
3	ARRC_LPM_P10	-0,06972	-0,09844	0,02872	-0,00027	0,01487	0,02336	-0,03025	-0,00896	-0,00895
5	MV	-0,05057	-0,02445	-0,02612	-0,00019	0,00803	0,13426	-0,02002	-0,02542	-0,02373
5	ARRC_MV	-0,07132	-0,04728	-0,02403	-0,00027	0,00893	0,32399	-0,02190	-0,03141	-0,02985
5	ARRC_LPM_Zero	-0,11935	-0,06511	-0,05423	-0,01834	0,01145	0,01191	-0,02652	-0,03551	-0,03300
5	ARRC_LPM_P50	-0,12141	-0,06770	-0,05371	-0,07276	0,01219	0,02309	-0,02821	-0,03258	-0,03083
5	ARRC_LPM_P25	-0,07353	-0,09435	0,02083	-0,00028	0,01395	0,02336	-0,02956	-0,01177	-0,01145
5	ARRC_LPM_P10	-0,06296	-0,09847	0,03551	-0,00024	0,01480	0,02336	-0,03005	-0,00776	-0,00766

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 21 - Métricas para cenário HIGH e $w_{alt} = 10\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,05524	-0,02445	-0,03078	-0,00021	0,00802	0,33307	-0,02003	-0,02805	-0,02610
1	ARRC_MV	-0,08375	-0,09123	0,00748	-0,00448	0,01078	0,12676	-0,02557	-0,02628	-0,02385
1	ARRC_LPM_Zero	-0,06467	-0,09745	0,03278	-0,00025	0,01429	0,02336	-0,02969	-0,00911	-0,00892
1	ARRC_LPM_P50	-0,05302	-0,09777	0,04475	-0,00020	0,01471	0,02336	-0,02971	-0,00592	-0,00591
1	ARRC_LPM_P25	0,00226	-0,09855	0,10082	0,00001	0,01522	0,02336	-0,03035	0,00539	0,00607
1	ARRC_LPM_P10	0,00226	-0,10003	0,10229	0,00001	0,01522	0,02336	-0,03035	0,00539	0,00607
3	MV	-0,05524	-0,02445	-0,03078	-0,00021	0,00802	0,33307	-0,02003	-0,02805	-0,02610
3	ARRC_MV	-0,07790	-0,05728	-0,02062	-0,00030	0,00911	0,04701	-0,02222	-0,03266	-0,03114
3	ARRC_LPM_Zero	-0,10199	-0,08710	-0,01490	-0,00039	0,01330	0,02336	-0,02952	-0,02020	-0,01880
3	ARRC_LPM_P50	-0,07620	-0,08799	0,01179	-0,00029	0,01403	0,02336	-0,02969	-0,01216	-0,01184
3	ARRC_LPM_P25	-0,01467	-0,09596	0,08129	-0,00006	0,01511	0,02336	-0,03035	0,00208	0,00259
3	ARRC_LPM_P10	0,00226	-0,09844	0,10070	0,00001	0,01522	0,02336	-0,03035	0,00539	0,00607
5	MV	-0,05524	-0,02445	-0,03078	-0,00021	0,00802	0,33307	-0,02003	-0,02805	-0,02610
5	ARRC_MV	-0,07369	-0,04728	-0,02641	-0,00028	0,00887	0,16997	-0,02181	-0,03276	-0,03118
5	ARRC_LPM_Zero	-0,10368	-0,06511	-0,03856	-0,00040	0,01277	0,02336	-0,02928	-0,02274	-0,02017
5	ARRC_LPM_P50	-0,09341	-0,06770	-0,02571	-0,00036	0,01327	0,02336	-0,02951	-0,01828	-0,01702
5	ARRC_LPM_P25	-0,02910	-0,09435	0,06526	-0,00011	0,01486	0,02336	-0,03015	-0,00096	-0,00051
5	ARRC_LPM_P10	0,00226	-0,09847	0,10073	0,00001	0,01522	0,02336	-0,03035	0,00539	0,00607

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 22 – Métricas para cenário LOW e $w_{alt} = 25\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,03974	-0,02445	-0,01529	-0,00015	0,00690	0,15144	-0,01693	-0,02288	-0,02166
1	ARRC_MV	-0,08220	-0,09123	0,00903	-0,02231	0,00876	0,17395	-0,02120	-0,03323	-0,03121
1	ARRC_LPM_Zero	-0,11303	-0,09745	-0,01557	0,02904	0,01048	0,13120	-0,02451	-0,03245	-0,03024
1	ARRC_LPM_P50	-0,10679	-0,09777	-0,00902	0,02904	0,01078	0,08395	-0,02449	-0,02904	-0,02822
1	ARRC_LPM_P25	-0,09436	-0,09855	0,00420	-0,01912	0,01170	0,01576	-0,02478	-0,02492	-0,02570
1	ARRC_LPM_P10	-0,06532	-0,10003	0,03471	-0,00025	0,01189	0,09190	-0,02509	-0,01191	-0,01161
3	MV	-0,03974	-0,02445	-0,01529	-0,00015	0,00690	0,15144	-0,01693	-0,02288	-0,02166
3	ARRC_MV	-0,06740	-0,05728	-0,01013	-0,00026	0,00813	0,36998	-0,01981	-0,03091	-0,02966
3	ARRC_LPM_Zero	-0,08834	-0,08710	-0,00124	0,02904	0,00983	0,10523	-0,02312	-0,02828	-0,02572
3	ARRC_LPM_P50	-0,09889	-0,08799	-0,01090	0,13543	0,01023	0,12797	-0,02395	-0,02962	-0,02721
3	ARRC_LPM_P25	-0,10240	-0,09596	-0,00644	-0,01912	0,01138	0,01576	-0,02469	-0,02801	-0,02857
3	ARRC_LPM_P10	-0,06532	-0,09844	0,03312	-0,00025	0,01189	0,09190	-0,02509	-0,01191	-0,01161
5	MV	-0,03974	-0,02445	-0,01529	-0,00015	0,00690	0,15144	-0,01693	-0,02288	-0,02166
5	ARRC_MV	-0,05689	-0,04728	-0,00961	-0,00022	0,00773	0,33341	-0,01897	-0,02828	-0,02710
5	ARRC_LPM_Zero	-0,07407	-0,06511	-0,00896	0,02904	0,00934	0,10226	-0,02194	-0,02607	-0,02302
5	ARRC_LPM_P50	-0,08504	-0,06770	-0,01733	0,02164	0,00960	0,10395	-0,02251	-0,02871	-0,02560
5	ARRC_LPM_P25	-0,10570	-0,09435	-0,01134	-0,09491	0,01112	0,08510	-0,02453	-0,02929	-0,02941
5	ARRC_LPM_P10	-0,06532	-0,09847	0,03315	-0,00025	0,01189	0,09190	-0,02509	-0,01191	-0,01161

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 23 - Métricas para cenário BASE e $w_{alt} = 25\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,04440	-0,02445	-0,01995	-0,00017	0,00689	0,18790	-0,01694	-0,02589	-0,02439
1	ARRC_MV	-0,06725	-0,09123	0,02398	0,01043	0,00907	0,11331	-0,02157	-0,02509	-0,02284
1	ARRC_LPM_Zero	-0,07061	-0,09745	0,02684	-0,00027	0,01177	0,09190	-0,02509	-0,01360	-0,01331
1	ARRC_LPM_P50	-0,03618	-0,09777	0,06159	-0,00014	0,01207	0,09190	-0,02503	-0,00418	-0,00394
1	ARRC_LPM_P25	-0,05860	-0,09855	0,03996	-0,00022	0,01241	0,09190	-0,02556	-0,00885	-0,00897
1	ARRC_LPM_P10	0,00466	-0,10003	0,10469	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
3	MV	-0,04440	-0,02445	-0,01995	-0,00017	0,00689	0,18790	-0,01694	-0,02589	-0,02439
3	ARRC_MV	-0,06815	-0,05728	-0,01087	-0,00026	0,00798	0,30064	-0,01963	-0,03194	-0,03043
3	ARRC_LPM_Zero	-0,09918	-0,08710	-0,01208	0,04066	0,01095	0,09171	-0,02493	-0,02660	-0,02564
3	ARRC_LPM_P50	-0,06796	-0,08799	0,02003	-0,00026	0,01158	0,09190	-0,02493	-0,01355	-0,01301
3	ARRC_LPM_P25	-0,04694	-0,09596	0,04902	-0,00018	0,01229	0,09190	-0,02521	-0,00634	-0,00624
3	ARRC_LPM_P10	0,00466	-0,09844	0,10311	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
5	MV	-0,04440	-0,02445	-0,01995	-0,00017	0,00689	0,18790	-0,01694	-0,02589	-0,02439
5	ARRC_MV	-0,06197	-0,04728	-0,01468	-0,00024	0,00764	0,09016	-0,01886	-0,03146	-0,02995
5	ARRC_LPM_Zero	-0,10544	-0,06511	-0,04033	0,00587	0,01055	0,05443	-0,02466	-0,00024	-0,03017
5	ARRC_LPM_P50	-0,08040	-0,06770	-0,01270	-0,00031	0,01104	0,09190	-0,02493	-0,01905	-0,01761
5	ARRC_LPM_P25	-0,04692	-0,09435	0,04744	-0,00018	0,01217	0,09190	-0,02505	-0,00660	-0,00643
5	ARRC_LPM_P10	0,00466	-0,09847	0,10314	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 24 - Métricas para cenário HIGH e $w_{alt} = 25\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,04907	-0,02445	-0,02461	-0,00019	0,00688	0,06449	-0,01694	-0,02891	-0,02708
1	ARRC_MV	-0,07753	-0,09123	0,01370	-0,01966	0,00920	0,09820	-0,02205	-0,02814	-0,02594
1	ARRC_LPM_Zero	-0,04282	-0,09745	0,05464	-0,00016	0,01225	0,09190	-0,02505	-0,00543	-0,00531
1	ARRC_LPM_P50	0,00466	-0,09777	0,10244	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
1	ARRC_LPM_P25	0,00466	-0,09855	0,10322	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
1	ARRC_LPM_P10	0,00466	-0,10003	0,10469	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
3	MV	-0,04907	-0,02445	-0,02461	-0,00019	0,00688	0,06449	-0,01694	-0,02891	-0,02708
3	ARRC_MV	-0,07240	-0,05728	-0,01512	-0,00028	0,00783	0,14863	-0,01941	-0,03481	-0,03307
3	ARRC_LPM_Zero	-0,05982	-0,08710	0,02727	-0,00023	0,01173	0,09190	-0,02498	-0,01097	-0,01054
3	ARRC_LPM_P50	-0,02333	-0,08799	0,06466	-0,00009	0,01244	0,09190	-0,02543	-0,00047	-0,00010
3	ARRC_LPM_P25	0,00466	-0,09596	0,10063	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
3	ARRC_LPM_P10	0,00466	-0,09844	0,10311	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
5	MV	-0,04907	-0,02445	-0,02461	-0,00019	0,00688	0,06449	-0,01694	-0,02891	-0,02708
5	ARRC_MV	-0,06501	-0,04728	-0,01773	-0,00025	0,00757	0,21372	-0,01877	-0,03338	-0,03183
5	ARRC_LPM_Zero	-0,07489	-0,06511	-0,00977	-0,00029	0,01117	0,09190	-0,02491	0,00000	-0,01570
5	ARRC_LPM_P50	-0,04976	-0,06770	0,01794	-0,00019	0,01188	0,09190	-0,02507	-0,00800	-0,00756
5	ARRC_LPM_P25	0,00466	-0,09435	0,09902	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684
5	ARRC_LPM_P10	0,00466	-0,09847	0,10314	0,00002	0,01268	0,09190	-0,02556	0,00626	0,00684

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 25 - Métricas para cenário LOW e $w_{alt} = 50\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,02946	-0,02445	-0,00501	-0,00011	0,00601	0,05142	-0,01358	-0,01897	-0,01872
1	ARRC_MV	-0,04248	-0,09123	0,04875	0,11211	0,00708	0,14344	-0,01692	-0,02052	-0,01921
1	ARRC_LPM_Zero	-0,06998	-0,09745	0,02747	-0,02487	0,00857	0,35235	-0,01887	-0,02791	-0,02842
1	ARRC_LPM_P50	-0,03187	-0,09777	0,06590	-0,00012	0,00866	0,26829	-0,01894	-0,00765	-0,00746
1	ARRC_LPM_P25	-0,01245	-0,09855	0,08610	-0,00005	0,00883	0,27230	-0,01890	-0,00028	-0,00027
1	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,10003	0,10870	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	MV	-0,02946	-0,02445	-0,00501	-0,00011	0,00601	0,05142	-0,01358	-0,01897	-0,01872
3	ARRC_MV	-0,05341	-0,05728	0,00387	-0,01805	0,00686	0,21709	-0,01660	-0,02815	-0,02678
3	ARRC_LPM_Zero	-0,07973	-0,08710	0,00737	-0,03838	0,00820	0,20495	-0,01863	-0,03296	-0,03256
3	ARRC_LPM_P50	-0,04027	-0,08799	0,04772	-0,00015	0,00861	0,26688	-0,01896	-0,01088	-0,01070
3	ARRC_LPM_P25	-0,01245	-0,09596	0,08351	-0,00005	0,00883	0,27230	-0,01890	-0,00028	-0,00027
3	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,09844	0,10711	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
5	MV	-0,02946	-0,02445	-0,00501	-0,00011	0,00601	0,05142	-0,01358	-0,01897	-0,01872
5	ARRC_MV	-0,04402	-0,04728	0,00326	-0,02356	0,00651	0,16951	-0,01557	-0,02530	-0,02466
5	ARRC_LPM_Zero	-0,07901	-0,06511	-0,01389	-0,02832	0,00797	0,35638	-0,01856	0,00000	-0,03233
5	ARRC_LPM_P50	-0,04789	-0,06770	0,01982	-0,00018	0,00838	0,25730	-0,01884	-0,01479	-0,01410
5	ARRC_LPM_P25	-0,01245	-0,09435	0,08190	-0,00005	0,00883	0,27230	-0,01890	-0,00028	-0,00027
5	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,09847	0,10714	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 26 - Métricas para cenário BASE e $w_{alt} = 50\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,03412	-0,02445	-0,00967	-0,00013	0,00601	0,05205	-0,01360	-0,02215	-0,02177
1	ARRC_MV	-0,05501	-0,09123	0,03622	0,05724	0,00747	0,07588	-0,01804	-0,02419	-0,02308
1	ARRC_LPM_Zero	-0,02264	-0,09745	0,07482	0,00000	0,00899	0,12605	-0,01920	-0,00344	-0,00328
1	ARRC_LPM_P50	0,00867	-0,09777	0,10644	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
1	ARRC_LPM_P25	0,00867	-0,09855	0,10722	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
1	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,10003	0,10870	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	MV	-0,03412	-0,02445	-0,00967	-0,00013	0,00601	0,05205	-0,01360	-0,02215	-0,02177
3	ARRC_MV	-0,05690	-0,05728	0,00037	-0,01768	0,00675	0,18322	-0,01657	-0,03053	-0,02929
3	ARRC_LPM_Zero	-0,02407	-0,08710	0,06303	0,00000	0,00888	0,13922	-0,01894	-0,00421	-0,00415
3	ARRC_LPM_P50	0,00867	-0,08799	0,09666	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	ARRC_LPM_P25	0,00867	-0,09596	0,10463	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,09844	0,10711	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
5	MV	-0,03412	-0,02445	-0,00967	-0,00013	0,00601	0,05205	-0,01360	-0,02215	-0,02177
5	ARRC_MV	-0,04889	-0,04728	-0,00161	0,00000	0,00645	0,12536	-0,01552	-0,02855	-0,02785
5	ARRC_LPM_Zero	-0,03490	-0,06511	0,03021	0,00000	0,00866	0,13759	-0,01893	0,00000	-0,00851
5	ARRC_LPM_P50	-0,00386	-0,06770	0,06384	-0,00001	0,00907	0,14081	-0,01920	0,00307	0,00327
5	ARRC_LPM_P25	0,00867	-0,09435	0,10302	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
5	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,09847	0,10714	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 27 - Métricas para cenário HIGH e $w_{alt} = 50\%$.

γ	Modelo	CE	CE (não-hedgeado)	ΔCE	Média	Desvio-padrão	LPM ₂ (τ)	ES(5%)	Sharpe	Sortino
1	MV	-0,03879	-0,02445	-0,01433	-0,00015	0,00600	0,13843	-0,01362	-0,02533	-0,02480
1	ARRC_MV	-0,09220	-0,09123	-0,00097	-0,00035	0,00736	0,31431	-0,01813	-0,04587	-0,04398
1	ARRC_LPM_Zero	0,00867	-0,09745	0,10612	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
1	ARRC_LPM_P50	0,00867	-0,09777	0,10644	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
1	ARRC_LPM_P25	0,00867	-0,09855	0,10722	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
1	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,10003	0,10870	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	MV	-0,03879	-0,02445	-0,01433	-0,00015	0,00600	0,13843	-0,01362	-0,02533	-0,02480
3	ARRC_MV	-0,07627	-0,05728	-0,01900	-0,00029	0,00673	0,02568	-0,01650	-0,04283	-0,04134
3	ARRC_LPM_Zero	0,00867	-0,08710	0,09576	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	ARRC_LPM_P50	0,00867	-0,08799	0,09666	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	ARRC_LPM_P25	0,00867	-0,09596	0,10463	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
3	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,09844	0,10711	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
5	MV	-0,03879	-0,02445	-0,01433	-0,00015	0,00600	0,13843	-0,01362	-0,02533	-0,02480
5	ARRC_MV	-0,06278	-0,04728	-0,01549	-0,00024	0,00647	0,14069	-0,01550	-0,03736	-0,03625
5	ARRC_LPM_Zero	0,00867	-0,06511	0,07378	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00000	0,00760
5	ARRC_LPM_P50	0,00867	-0,06770	0,07637	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
5	ARRC_LPM_P25	0,00867	-0,09435	0,10302	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760
5	ARRC_LPM_P10	0,00867	-0,09847	0,10714	-0,03886	0,00915	0,12635	-0,01920	0,00733	0,00760

Fonte: Resultados da pesquisa.